



# La ventilation enjeux énergétiques et sanitaires

Anaïs Bourry

## ► To cite this version:

Anaïs Bourry. La ventilation enjeux énergétiques et sanitaires. Energie électrique. 2012. dumas-01133815

**HAL Id: dumas-01133815**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01133815>**

Submitted on 20 Mar 2015

**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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS  
PARIS

---

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

LE DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE ENERGETIQUE

OPTION FROID ET CLIMATISATION

PAR ANAÏS BOURRY

---

LA VENTILATION  
ENJEUX ENERGETIQUES ET  
SANITAIRES

---

SOUTENU LE 8 OCTOBRE 2012

JURY

PRÉSIDENT

M. C. MARVILLET

MEMBRES

MME E. FOLGOAS

M. O. GUILLEMOT

M. I. JAFFAL

M. C. TOUBLANC

# Table des matières

|          |                                                                                                     |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                                                                 | <b>5</b>  |
| <b>2</b> | <b>Un habitat confortable</b>                                                                       | <b>7</b>  |
| 2.1      | Le confort thermique . . . . .                                                                      | 7         |
| 2.1.1    | L'homéothermie . . . . .                                                                            | 7         |
| 2.1.2    | L'activité . . . . .                                                                                | 8         |
| 2.1.3    | La tenue vestimentaire . . . . .                                                                    | 8         |
| 2.1.4    | L'air ambiant . . . . .                                                                             | 10        |
| 2.1.5    | Les parois . . . . .                                                                                | 10        |
| 2.1.6    | Les critères de confort thermique . . . . .                                                         | 11        |
| 2.1.7    | Le confort local . . . . .                                                                          | 14        |
| 2.2      | l'enveloppe . . . . .                                                                               | 15        |
| 2.2.1    | L'inertie . . . . .                                                                                 | 15        |
| 2.2.2    | L'isolation . . . . .                                                                               | 15        |
| 2.2.3    | Ponts thermiques, défauts d'isolation et risques de condensation . . . . .                          | 19        |
| 2.2.4    | L'étanchéité à l'air et la perméance à la vapeur d'eau . . . . .                                    | 21        |
| 2.2.5    | l'environnement extérieur . . . . .                                                                 | 26        |
| <b>3</b> | <b>Polluants et santé dans les logements</b>                                                        | <b>29</b> |
| 3.1      | Effets et études épidémiologiques . . . . .                                                         | 31        |
| 3.2      | Comportement d'un polluant . . . . .                                                                | 32        |
| 3.3      | L'humidité . . . . .                                                                                | 33        |
| 3.3.1    | Un problème souvent présent dans les logements . . . . .                                            | 33        |
| 3.3.2    | L'humidité, source de développement des moisissures . . . . .                                       | 36        |
| 3.3.3    | Moisissures : quels dangers pour la santé ? . . . . .                                               | 38        |
| 3.3.4    | L'humidité, les acariens et les blattes . . . . .                                                   | 40        |
| 3.3.5    | L'humidité et les bactéries . . . . .                                                               | 41        |
| 3.4      | Le monoxyde de carbone . . . . .                                                                    | 43        |
| 3.5      | Les COV, composés organiques volatils . . . . .                                                     | 46        |
| 3.6      | Les particules . . . . .                                                                            | 48        |
| 3.7      | Les pesticides . . . . .                                                                            | 51        |
| 3.8      | le tabac : particules et COV . . . . .                                                              | 52        |
| 3.9      | Les acteurs de la qualité de l'air et leurs champs d'action . . . . .                               | 53        |
| 3.9.1    | Niveau international : l'OMS . . . . .                                                              | 53        |
| 3.9.2    | Niveau européen : les produits de construction . . . . .                                            | 53        |
| 3.9.3    | Niveau français : le Plan Santé Environnement et l'Observatoire de la<br>qualité de l'air . . . . . | 54        |
| 3.10     | Les actions . . . . .                                                                               | 54        |
| 3.10.1   | La classification des produits . . . . .                                                            | 54        |

|          |                                                                            |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.10.2   | Le Règlement des Produits de Construction . . . . .                        | 57         |
| 3.10.3   | Les FDES . . . . .                                                         | 57         |
| 3.10.4   | L'étiquetage . . . . .                                                     | 58         |
| 3.10.5   | Les valeurs guides de l'OMS et de l'OQAI . . . . .                         | 59         |
| 3.10.6   | le projet IAIAQ de l'Europe . . . . .                                      | 63         |
| 3.10.7   | Incitations pour des constructions plus saines . . . . .                   | 64         |
| 3.11     | les chiffres de la qualité de l'air intérieur . . . . .                    | 66         |
| <b>4</b> | <b>La ventilation d'un logement</b>                                        | <b>69</b>  |
| 4.1      | Les textes . . . . .                                                       | 69         |
| 4.2      | Les systèmes de ventilation . . . . .                                      | 71         |
| 4.2.1    | la ventilation naturelle . . . . .                                         | 71         |
| 4.2.2    | la ventilation mécanique simple flux . . . . .                             | 74         |
| 4.2.3    | la ventilation mécanique simple flux hygroréglable . . . . .               | 75         |
| 4.2.4    | la ventilation mécanique double flux . . . . .                             | 76         |
| 4.2.5    | La ventilation en fonctionnement . . . . .                                 | 78         |
| 4.2.6    | Quels systèmes utilisés en France ? . . . . .                              | 81         |
| 4.3      | La ventilation pour limiter la pollution ? . . . . .                       | 83         |
| 4.3.1    | Dilution des polluants et efficacité des systèmes de ventilation . . . . . | 83         |
| 4.3.2    | Pollution à l'entrée du logement . . . . .                                 | 84         |
| 4.3.3    | Pollution dans le système de ventilation . . . . .                         | 84         |
| 4.4      | Comparaison de systèmes de ventilation . . . . .                           | 85         |
| 4.4.1    | Les débits de ventilation . . . . .                                        | 85         |
| 4.4.2    | La modulation des débits . . . . .                                         | 88         |
| 4.4.3    | Le système de ventilation . . . . .                                        | 91         |
| 4.4.4    | Les systèmes de ventilation et la qualité de l'air intérieur . . . . .     | 109        |
| 4.5      | Consommations et confort thermique . . . . .                               | 109        |
| 4.5.1    | En été . . . . .                                                           | 113        |
| 4.5.2    | En hiver . . . . .                                                         | 115        |
| 4.5.3    | Consommations et émissions de gaz à effet de serre . . . . .               | 120        |
| <b>5</b> | <b>Conclusion</b>                                                          | <b>123</b> |

## Remerciements

Ce mémoire marque la fin de mon parcours au Cnam, entrepris il y a quatre ans dans le cadre d'une reconversion professionnelle. C'est l'aboutissement d'une période charnière de ma vie professionnelle et personnelle. J'ai eu la chance d'avoir à mes côtés des personnes qui m'ont soutenue et d'avoir rencontré des professionnels de qualité tout au long de ce chemin.

La première personne que je souhaite remercier est mon conjoint, qui m'a soutenue dès le début et qui m'a fait confiance quand j'ai décidé de tout reprendre à zéro, qui a été un professeur patient quand j'ai dû me refamiliariser avec les mathématiques, qui a accepté de mettre de côté les week end de ces quatre dernières années, qui m'a encouragée, particulièrement tout au long de cette dernière année de mémoire et qui m'a facilité la tâche informatique avec LaTeX!

Merci à Stéphane, mon ancien patron, et Elodie, mon amie, qui n'ont eu de cesse de m'encourager à foncer dans ce projet. Merci à ma famille proche de m'avoir soutenue à chaque étape.

Je tiens à remercier Monsieur Meunier, ancien responsable de la formation que j'ai suivie, qui m'a accueillie au Cnam et qui m'a conseillée tout au long du parcours. Je remercie Monsieur Clausse, mon tuteur, qui a accepté d'encadrer ce mémoire.

Je remercie Madame Folgoas, architecte, qui, par l'approche qu'elle a de son métier, m'a fait comprendre l'importance de la prise en compte de l'utilisateur dans la conception d'un bâtiment.

Je remercie Olivier Guillemot, mon patron, qui nous pousse à voir au-delà de notre métier, qui m'a orientée vers ce sujet et qui m'a suivie dans ce travail. Un grand merci à toute l'équipe de Polenn, merci pour vos questions pertinentes, vos encouragements et votre grande patience.



# Chapitre 1

## Introduction

La transition énergétique qui nous attend a plus de chance de réussir si elle passe par une révolution sociétale que simplement par des évolutions technologiques. Lutter contre le changement climatique et à la raréfaction des ressources fossiles nous demande de prendre aujourd'hui des décisions environnementales pour demain, mais leur impact et leur ampleur ne peuvent être positifs si ces décisions se limitent aux acteurs concernés et qu'elles n'amènent pas à des changements de comportement à plus large échelle.

Face aux questions énergétiques et au réchauffement du climat, l'Union Européenne a établi plusieurs directives et documents incitant les pays membres à mettre en place leurs réglementations thermiques : la directive 93/73/CEE (directive du conseil du 13 septembre 1993 sur la limitation des émissions de CO<sub>2</sub> au travers de l'amélioration de l'efficacité énergétique), la directive 2002/91/CE également appelée Energy Performance of Buildings Directive (directive du conseil et du parlement européen du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments) et le livre vert européen (2000). Dans les divers pays européens, les réglementations thermiques ont donc vu le jour et ont apporté un cadre aux modes constructifs, les climats et les habitudes de chaque pays influençant le choix des contraintes imposées. En France, la réglementation thermique 2005 a amené progressivement les constructeurs vers le label BBC (Bâtiment Basse Consommation) imposant un niveau maximal de consommation énergétique (chauffage, eau chaude sanitaire, auxiliaires, ventilation et éclairage) et demandant aux entreprises de se former aux techniques d'étanchéité à l'air des bâtiments.

Entré dans le vocabulaire de la construction il y a peu de temps, le niveau BBC est l'équivalent du standard de la réglementation thermique 2012. Celle-ci a pour objectif les bâtiments à énergie positive d'ici 2020. Petit à petit, le secteur du bâtiment réduit ses consommations énergétiques et amoindrit son impact sur le climat. Dans quelles conditions ? Quelles conséquences lorsque l'on distingue la performance thermique d'un bâtiment de sa fonction d'espace de vie ?

Pour atteindre des consommations énergétiques de plus en plus basses, les déperditions d'un bâtiment doivent être les plus faibles possibles. Les niveaux d'isolation sont renforcés au fur et à mesure des réglementations thermiques et les déperditions par l'air sont toujours plus limitées. Cela implique plus de produits de construction dans le bâtiment et des débits d'air mieux maîtrisés. En France, où la question de l'étanchéité à l'air n'est présente que depuis quelques années, les professionnels du bâtiment se retrouvent face à un enjeu majeur : un bâtiment qui ne respire plus par sa peau doit disposer d'un système de ventilation efficace sur un aspect sanitaire et performant énergétiquement. L'équation est complexe et fait intervenir des variables que l'on a encore peu l'habitude d'associer. Et les impacts écologiques et sanitaires sont tout aussi importants dans la conception d'un bâtiment que sa qualité architecturale et son impact

énergétique. De plus en plus d'études scientifiques font un lien entre la présence de certains polluants dans l'environnement intérieur et des maladies respiratoires allergiques ou infectieuses, certaines associent la montée des maladies respiratoires et la prise en compte des questions énergétiques dans les choix constructifs. L'ampleur du problème est telle que différents pays d'Europe lancent des études pour chiffrer le coût des maladies liées à la qualité de l'air.

A l'heure où l'électricien doit s'entendre avec le plaquiste pour obtenir un bâtiment aussi performant que sur le papier, le bureau d'études fluide et l'architecte devraient peut-être eux aussi croiser d'autres corps de métier pour proposer un bâtiment confortable, sain et performant. Des échanges sur les choix faits en matière de ventilation permettraient de comprendre en quoi une tendance énergétique pèse sur la santé et le confort des occupants. L'intention de ce mémoire est d'analyser les trois composantes de la ventilation que sont les consommations énergétiques, le confort et la santé. L'objectif est de pouvoir déterminer l'impact des systèmes utilisés et d'en dégager des pistes de réflexion pour les choix de conception. Il ne présente pas une conclusion définitive mais constitue une base pour amorcer des études à mener dans ce domaine.

Nous présenterons dans une première partie ce qu'est un bâtiment et nous essaierons d'en ressortir quelques principes de confort et de performance énergétique. La seconde partie nous permettra de faire un recensement, non exhaustif, de quelques polluants problématiques présents dans un logement et d'identifier les actions nationales et internationales mises en place aujourd'hui pour y faire face. Enfin, nous étudierons les différents systèmes de ventilation mis en œuvre dans les logements et nous évaluerons leur adéquation avec les problématiques soulevées précédemment.



## Chapitre 2

# Un habitat confortable

Nous passons 80% de notre temps dans un espace clos, soit au travail ou à l'école, soit dans son logement. Les heures passées dans le logement en représentent la majeure partie, surtout pour les populations fragiles que sont les bébés, les enfants et les personnes âgées. Ce dernier constitue donc un espace de vie important où confort, qualité de vie, santé et maîtrise des charges forment une équation complexe à résoudre. Et aucune de ces variables ne peut être négligée si des avancées sont attendues à la fois sur un plan environnemental et sur un plan sociétal.

Le bâtiment apporte une enveloppe, protection physique, acoustique et thermique. Un bâtiment thermiquement confortable nécessite un travail de conception de cette enveloppe, prenant en compte des principes bioclimatiques (influence du climat et adaptation du mode de vie des usagers). D'autres facteurs environnants impactent les choix de conception : existe-t-il des sources de pollution extérieure ? L'environnement sonore est-il nuisible ? Enfin, ce qui se passe à l'intérieur du bâtiment (les modes d'occupation, les usages et les activités des habitants, les produits de construction et de décoration, etc.) affecte plus ou moins la santé ainsi que la pérennité de l'enveloppe du bâtiment et doit être appréhendé en amont de la construction de façon à en réduire l'impact.

### 2.1 Le confort thermique

Le confort thermique dépend de différents facteurs. L'Homme est avant tout une machine conçue pour s'autoréguler jusqu'à une certaine limite. Il sera sensible aux rayonnements de chaleur non homogènes, aux courants d'air froid, aux apports intenses, à l'humidité.

#### 2.1.1 L'homéothermie

L'Homme régule la production ou l'évacuation de chaleur naturellement. La température centrale du corps humain est de 37°C et la température de la peau est de 33 à 34°C. Pour maintenir ces deux seuils constants, des mécanismes instinctifs sont mis en œuvre. Les capteurs de température (à la surface de la peau et au cœur de l'hypothalamus) lui donnent le signal. En cas de sensation de froid, ceux de la peau indiquent au corps humain qu'il doit produire plus de chaleur. Si les capteurs situés dans l'hypothalamus détectent une sensation de chaud, le corps va chercher à évacuer cette chaleur. C'est un véritable système thermodynamique. Nous pouvons résumer les mécanismes ainsi :

Si la température centrale du corps s'élève, l'individu échange avec l'ambiance :

- par convection, grâce à l'augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins ce qui a pour conséquence d'augmenter le débit de sang à la surface de la peau et d'améliorer les échanges avec l'ambiance,
- par évaporation de la vapeur d'eau émise par le corps à travers la transpiration et la respiration, ce qui favorise l'émission de chaleur vers l'ambiance grâce à la chaleur latente élevée de la transpiration (proche de celle de l'eau, à savoir environ 2 500 kJ/kg).

En cas de baisse de la température de la peau, le corps humain :

- limite ses échanges par convection grâce au principe de la vasoconstriction des vaisseaux sanguins,
- produit de la chaleur en stimulant les muscles, grâce à la dégradation des substances nutritives. Cette production peut être comparée à la combustion dans un système de chauffage.

### 2.1.2 L'activité

L'homme produit de la chaleur même au repos. Dès qu'il se met en activité, cette production de chaleur augmente. Cette chaleur est liée à la mise en mouvement des muscles, volontaire ou non. La chaleur interne produite est ensuite émise vers l'ambiance si besoin grâce au système de régulation de l'individu. On utilise une mesure pour quantifier cette chaleur produite, c'est l'équivalent métabolique. Au repos, l'équivalent métabolique est de 58 W/m<sup>2</sup>, soit environ 104 W pour une personne standard dont la surface cutanée équivaut à 1,8m<sup>2</sup>. Il varie entre 180 W/m<sup>2</sup> et 360 W/m<sup>2</sup> lors d'une marche rapide et dépasse 360 W/m<sup>2</sup> lors d'une course. Utiles en hiver dans un bâtiment, les apports internes liés à la présence et à l'activité des occupants peuvent être gênants en période estivale (risque de surchauffe). Le choix des matériaux (matériaux légers ou matériaux ayant une certaine inertie) et du système de ventilation doit être adapté au type de logement et au type d'occupation dans le logement de façon à garantir un confort thermique en hiver et en été.

### 2.1.3 La tenue vestimentaire

La tenue vestimentaire d'un individu peut être comparée à l'enveloppe d'un bâtiment. Elle protège l'individu des échanges par convection, par rayonnement et par conduction. Une tenue vestimentaire couvrant le corps atténue les échanges avec l'air ambiant en limitant la surface cutanée soumise aux flux convectifs et au rayonnement, une tenue épaisse ajoute une résistance thermique entre le corps et l'ambiance. A l'inverse, une faible épaisseur, des matières peu fibreuses ou une faible couverture du corps laisse place aux échanges thermiques avec l'ambiance. C'est l'effet recherché en été sous nos climats.

L'unité d'habillement est le *clo*. Le *clo* représente l'isolement vestimentaire de l'ensemble de la tenue. 1 *clo* équivaut à une résistance thermique de 0,155 m<sup>2</sup>.K/W et correspond à une tenue constituée d'une chemise à manche longue, un pantalon, un pull-over à manche longue, des chaussettes épaisses et des chaussures.

| Vêtement                        | $I_{cl}$ en Clo<br>(unité de mesure de la<br>résistance thermique<br>des vêtements :<br>1 Clo = 0,155 m <sup>2</sup> .K/W) | $I_{cl}$<br>en m <sup>2</sup> .K/W |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Slip                            | 0,03                                                                                                                       | 0,005                              |
| Caleçon                         | 0,04                                                                                                                       | 0,006                              |
| Caleçon long                    | 0,1                                                                                                                        | 0,016                              |
| Soutien-gorge                   | 0,01                                                                                                                       | 0,002                              |
| T-shirt "Marcel"                | 0,06                                                                                                                       | 0,009                              |
| T-shirt                         | 0,09                                                                                                                       | 0,014                              |
| T-Shirt manches longues         | 0,12                                                                                                                       | 0,019                              |
| Chemise manches courtes         | 0,09                                                                                                                       | 0,029                              |
| Chemise manches longues         | 0,25                                                                                                                       | 0,039                              |
| Short                           | 0,06                                                                                                                       | 0,009                              |
| Light-weight trousers           | 0,20                                                                                                                       | 0,031                              |
| Pantalon                        | 0,25                                                                                                                       | 0,039                              |
| Blouse/bleu de travail          | 0,50                                                                                                                       | 0,078                              |
| Sweat-shirt (fin)               | 0,2                                                                                                                        | 0,031                              |
| Sweat-shirt (normal)            | 0,28                                                                                                                       | 0,043                              |
| Sweat-shirt (épais)             | 0,35                                                                                                                       | 0,054                              |
| Veste d'été                     | 0,25                                                                                                                       | 0,039                              |
| Veste                           | 0,35                                                                                                                       | 0,054                              |
| Veste de Smoking                | 0,3                                                                                                                        | 0,047                              |
| Manteau                         | 0,6                                                                                                                        | 0,093                              |
| Veste longue                    | 0,55                                                                                                                       | 0,085                              |
| Parka                           | 0,7                                                                                                                        | 0,109                              |
| Chaussettes d'été               | 0,02                                                                                                                       | 0,003                              |
| Chaussettes épaisses            | 0,05                                                                                                                       | 0,008                              |
| Chaussettes longues             | 0,1                                                                                                                        | 0,016                              |
| Chaussures semelles fines       | 0,02                                                                                                                       | 0,003                              |
| Chaussures semelles épaisses    | 0,04                                                                                                                       | 0,006                              |
| Bottes                          | 0,1                                                                                                                        | 0,016                              |
| Gants                           | 0,05                                                                                                                       | 0,008                              |
| Jupe (15 cm au-dessus du genou) | 0,10                                                                                                                       | 0,016                              |
| Jupe (15 cm sous le genou)      | 0,18                                                                                                                       | 0,028                              |
| Jupe à hauteur de genou         | 0,25                                                                                                                       | 0,039                              |
| Robe sans manche                | 0,25                                                                                                                       | 0,039                              |
| Robe manches longues            | 0,4                                                                                                                        | 0,062                              |
| Pyjama hôpital                  | 0,31                                                                                                                       | 0,048                              |
| Pyjama                          | 0,50                                                                                                                       | 0,078                              |

FIGURE 2.1: Résistance thermique en fonction de la tenue vestimentaire

### 2.1.4 L'air ambiant

L'air ambiant génère des échanges thermiques avec l'individu et, selon les conditions, peut provoquer des situations d'inconfort.

Par exemple, en hiver, un air humide augmente la sensation de froid. L'eau a une chaleur massique plus élevée que l'air. Au contact de la vapeur d'eau contenue dans l'air, la peau de l'individu cède une quantité de chaleur qui sera d'autant plus grande que l'air contient beaucoup de vapeur d'eau. En été, un air très humide n'est pas non plus confortable. Comme nous l'avons vu précédemment, le corps utilise l'évaporation pour abaisser sa température : il cède de la chaleur afin d'évaporer les gouttes de sueur à la surface de la peau, évacuant ainsi vers l'ambiance sa chaleur interne. Cependant, l'air ne peut contenir une quantité de vapeur d'eau illimitée et si l'air est déjà bien humide, il deviendra plus difficile d'apporter à l'ambiance la vapeur d'eau supplémentaire de la transpiration.

La convection joue également un rôle dans les échanges avec l'air ambiant. Plus l'air est en mouvement, plus l'échange convectif est grand et plus l'évaporation de la transpiration à la surface de la peau est facilitée. Il devient donc agréable en été d'être dans un espace où l'air est en mouvement. En présence d'un ventilateur, l'Homme peut accepter facilement 2 à 3°C supplémentaire avant de ressentir un inconfort. En revanche, en hiver, il n'est pas souhaitable d'avoir de grands mouvements d'air. La température de consigne de chauffage est généralement de 19°C, soit environ 13°C de moins que la température à la surface de la peau. Un mouvement d'air important à 19°C générerait de fortes déperditions du corps vers l'ambiance. Ce phénomène est encore plus désagréable avec un air en provenance de l'extérieur qui n'est pas préchauffé avant son entrée dans le logement. C'est le cas pour les systèmes de ventilation simple flux où l'air vient directement depuis l'extérieur (comme nous le verrons en troisième partie dans l'analyse des systèmes de ventilation).

### 2.1.5 Les parois

Les parois sont des éléments rayonnants ou absorbants selon leur température et leur composition par rapport aux objets environnants. La température ressentie par l'individu dépend donc à la fois de la température de l'air ambiant et des échanges radiatifs avec les parois. A cela s'ajoute la vitesse de l'air. On parle de température opérative ou de température résultante sèche. Elle se caractérise par la formule suivante :

$$T_o = \frac{h_r T_r + h_c T_a}{h_r + h_c}$$

où  $h_r$  et  $h_c$  sont respectivement les coefficients d'échange par rayonnement et d'échange convectif,

$T_r$  représente la température moyenne de rayonnement,

$T_a$ , la température de l'air ambiant.

Le coefficient d'échange convectif,  $h_c$  est fonction de la vitesse de l'air.  $T_r$  est déduite des mesures de la température de globe. Si l'on ne connaît pas ces dernières valeurs, il est toujours possible d'approcher la température ressentie en calculant la température résultante sèche. Dans un logement, la température résultante sèche peut être simplifiée ainsi : elle correspond à la moyenne de la température des parois,  $T_p$ , et de la température de l'air ambiant,  $T_a$ .

$$T_s = \frac{T_p + T_a}{2}$$

Si les parois présentent une température de 17°C et si l'air est à 19°C, la température résultante sèche sera de 18°C. Dans le cas de parois peu isolées, ces dernières auront une température particulièrement basse en hiver. Par exemple, si les parois ont une température de 15°C, il faudra, pour obtenir une sensation de confort équivalente à la situation précédente (18°C), sans tenir compte des mouvements d'air, que l'air ambiant soit à une température de 21°C, soit 2°C de plus en température de consigne. Or le simple écart d'un degré peut provoquer une augmentation de l'ordre de 10 à 15 % des consommations de chauffage pour un bâtiment performant.

### 2.1.6 Les critères de confort thermique

On peut considérer que la personne est dans une situation de confort thermique si elle peut maintenir sa température corporelle constante sans que les systèmes de régulation instinctifs ne se mettent en œuvre de manière perceptible et donc désagréable (Depecker et al [10]). L'environnement extérieur, par la température, la vitesse de l'air et l'hygrométrie, a un impact sur l'individu, en fonction des différents échanges que nous avons vu précédemment. Le schéma suivant résume les différents mécanismes de régulation de chaleur de l'individu et les échanges qu'il va avoir avec l'extérieur.

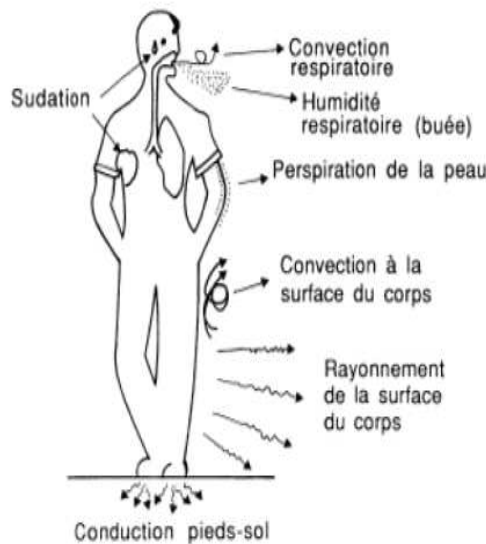


FIGURE 2.2: les mécanismes de régulation de la chaleur et les échanges thermiques avec l'ambiance - Depecker & al [10]

Par ailleurs, l'individu est soumis à ses propres paramètres physiologiques et au fonctionnement de ses capteurs. Il est donc difficile de déterminer le confort thermique uniquement en fonction de facteurs d'ambiance. Plusieurs critères permettent de qualifier une zone selon le confort thermique. Citons la norme la plus connue : la norme ISO 7730 qui découle des travaux de Fanger. Elle est basée sur l'indicateur PMV (Predicted Mean Vote) et sur l'indicateur PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) et permet d'obtenir une échelle de sensation thermique. L'indicateur PMV est fonction de l'équivalent métabolique, du travail, et de facteurs d'ambiance tels que les pressions de vapeur d'eau dans l'air ambiant, la température ambiante, la température des parois, la température du vêtement et le facteur d'échange convectif. Le résultat obtenu permet de positionner le confort thermique d'une zone sur une échelle allant de - 3 pour la

sensation de « trop froid » à + 3 pour la sensation de « trop chaud ». Ensuite, on détermine le nombre de personnes insatisfaites par la situation par l'indicateur PPD. Même si l'échelle du PMV atteint 0, c'est-à-dire confortable, il y aura toujours des personnes insatisfaites. En effet, la notion de confort thermique n'est pas que physique, elle fait également intervenir des critères physiologiques et psychologiques, bref l'individu lui-même.

L'équation utilisée pour le calcul du PMV a été obtenue grâce à une étude menée sur 1400 individus. Le vote de sensation thermique était réalisé après une charge thermique, les paramètres morphologiques (surface de corps nu), le métabolisme et la tenue vestimentaire étant pris en compte dans l'analyse du résultat du vote.

$$PMV = (0,303 \times e^{-0,036.M} + 0,028) \times X$$

avec

$$\begin{aligned} X &= (M - W) - 3,05.10^{-3} \times (5733 - 6,99(M - W) - P_{a,H_2O}) \\ &- (0,42 \times (M - W) - 58,15) - 1,7.10^{-5} \times M \times (5867 - P_{a,H_2O}) \\ &- 0,0014 \times M \times (34 - T_a) - 3,96.10^{-8} \times f_{cl} \times (T_{cl}^4 - T_r^4) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a) \end{aligned}$$

et M, l'équivalent métabolique (W/m<sup>2</sup>),

W, le travail mécanique échangé avec l'extérieur (W/m<sup>2</sup>) pris souvent égal à zéro,

$P_{a,H_2O}$ , la pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant (Pa),

$T_a$ , la température de l'air ambiant (°C),  $T_{cl}$ , la température de surface du vêtement (°C),

$T_r$ , la température moyenne de rayonnement des parois (°C),

$h_c$ , le coefficient d'échange par convection (W/m<sup>2</sup>.K),

$f_{cl}$ , le rapport de la surface du corps habillé à la surface du corps nu ( $f_{cl} = 1 + 1,290.I_{cl}$  pour  $I_{cl} \leq 0,078m^2.K/W$  et  $f_{cl} = 1 + 1,290.I_{cl}$  pour  $I_{cl} > 0,078m^2.K/W$ )

Le PPD est ensuite calculé ainsi :

$$PPD = 100 - 95 e^{-0,03353.PMV_4 + 0,2179.PMV_2}$$

La représentation suivante est la représentation graphique de cette dernière équation et permet de connaître le pourcentage de personnes insatisfaite en fonction du PMV obtenu.

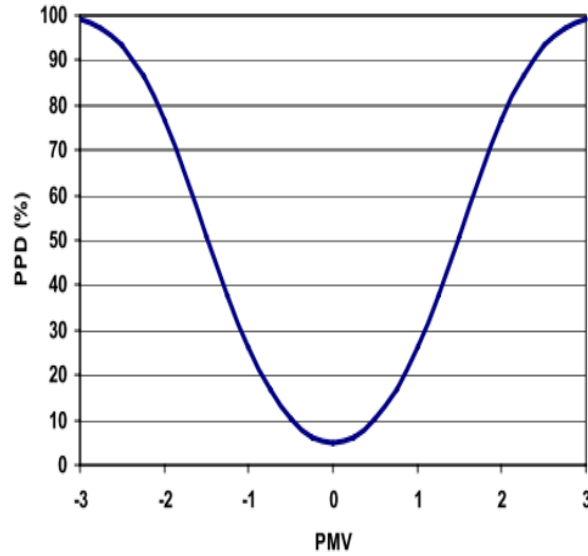


FIGURE 2.3: PPD en fonction du PMV

Rappelons que cette norme ne vaut que dans les ambiances thermiques suivantes :

M compris entre 46 et 232 W/m<sup>2</sup>.K

Icl compris entre 0 et 0,310 m<sup>2</sup>.K/W

$T_a$  comprise entre 10 et 30°C

$T_r$  comprise entre 10 et 40°C

Vitesse de l'air comprise entre 0 et 1m/s

$P_{a,H_2O}$  comprise entre 0 et 2700 Pa.

Pour définir une zone de confort thermique, la norme ISO 7730 s'appuie donc sur cette méthode en prenant en plus en compte les conditions extérieures (période hivernale ou période estivale).

La température effective peut également constituer un critère de confort thermique. Elle se calcule à partir de la température opérative, du coefficient de mouillure (pourcentage de surface de peau mouillée), de la tenue vestimentaire, du coefficient d'échange par convection, du coefficient d'évaporation (déduit du coefficient précédent par la relation  $h_e = 16,7 \times h_c$ ) et des pressions de vapeur d'eau. A la différence du calcul « PMV / PPD », elle ne tient pas compte directement de l'équivalent métabolique. En revanche, elle considère le coefficient de mouillure de la personne. Elle est calculée par la formule suivante :

$$ET = T_0 + w.i_m.LR(P_{a,H_2O} - 0,5.P_{sat,ET})$$

avec  $T_0$ , la température opérative,

w, le coefficient de mouillure,

$i_m$ , un indice représentant la tenue vestimentaire,

LR, le facteur de Lewis égal à  $h_e/h_c$ ,

$P_{a,H_2O}$ , la pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant

et  $P_{sat,ET}$ , la pression de saturation de vapeur d'eau à la température ET.

Le graphique suivant qualifie la zone thermique grâce à la formule précédente.

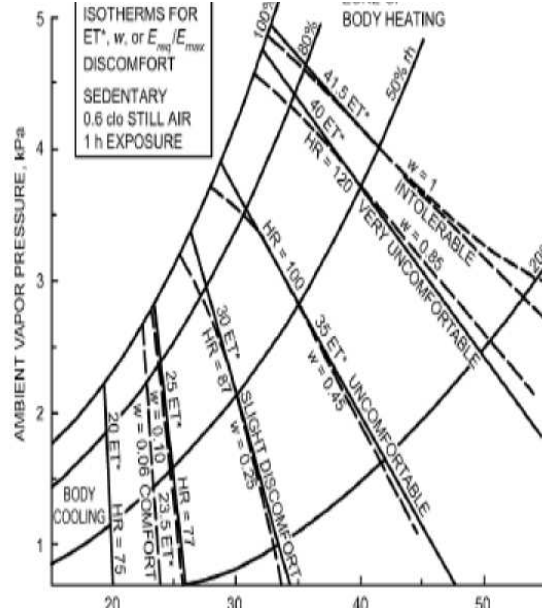


FIGURE 2.4: confort thermique selon la température effective

### 2.1.7 Le confort local

Les critères et les formules présentées précédemment traduisent le confort thermique global d'une zone. Cependant, une personne peut ressentir une certaine gêne liée des phénomènes d'inconfort locaux. Il peut s'agir par exemple d'asymétries de rayonnement, de courants d'air, etc.

Les asymétries de rayonnement sont liées à des températures de rayonnement en décalage avec l'ambiance globale de la pièce. Une paroi peut être froide car peu ou pas isolée alors que le reste de la zone est chaud. A l'inverse, la paroi peut être chaude lorsqu'il s'agit d'un vitrage frappé par le soleil. Ces situations amènent à des insatisfactions parce qu'elles génèrent des difficultés d'auto-régulation pour l'individu. Cette insatisfaction est d'autant plus marquée lorsqu'il s'agit d'un gradient vertical de température (pieds froids et tête chaude ou l'inverse).

Les courants d'air génèrent un inconfort caractérisé par l'indice DR (en %). Cette sensation, identifiée dans la norme ISO 7730, se calcule suivant la formule suivante :

$$DR = (34 - T_a) \cdot (\bar{V} - 0,05) \cdot 0,62 \cdot (0,37 \cdot \bar{V} \cdot t_u + 3,14)$$

avec  $T_a$ , la température ambiante (°C)

$\bar{V}$ , la vitesse de l'air (m/s)

$t_u$ , l'intensité de la turbulence (%) où  $t_u = \frac{\sigma v}{\bar{V}}$ , sachant que  $\sigma v$  est l'écart-type de la distribution des vitesses d'air (m/s)

La turbulence de l'air entre donc en ligne de compte dans ce calcul. Une sensation de courant d'air est accentuée si la vitesse de l'air est fluctuante, selon la tenue vestimentaire de la personne et en fonction de l'activité de la personne (une personne active ressentira moins de gêne qu'une personne immobile). On retrouve dans la norme ISO 7730 les courbes de vitesse à ne pas dépasser en fonction de la température et de l'intensité de la turbulence.



## 2.2 l'enveloppe

### 2.2.1 L'inertie

L'inertie tient à la capacité thermique volumique (en  $\text{kJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$ ) des matériaux, c'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré la température d'un volume d'une substance. C'est le produit de la chaleur spécifique ou capacité thermique massique (quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré la température d'une unité de masse d'une substance en  $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ) et de la masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). L'inertie d'un bâtiment a pour intérêt de lisser les variations de température dans le temps. En période de chauffe, les parois stockeuses rayonnent vers l'ambiance lorsque les apports internes ou externes n'ont plus lieu. En été, elles limitent les phénomènes de surchauffe dans la journée et restitue durant la nuit cette chaleur emmagasinée, à condition que les températures soient plus fraîches. L'inertie des matériaux peut être alliée au système de ventilation pour rafraîchir une zone : selon le climat et la teneur en apports diurnes, il peut être intéressant de mettre en place une stratégie de surventilation nocturne. Par convection, au contact de la paroi, l'air neuf évacue la chaleur stockée dans les parois, à condition que le gradient de température soit suffisamment intéressant.

La structure porteuse, base de l'enveloppe du bâtiment, a pour rôle principal de résister dans le temps et face aux intempéries. Cette structure est également actrice dans le confort de l'habitat. Elle peut apporter inertie et / ou déphasage (capacité du matériau à ralentir les transferts de chaleur) ou, au contraire, permettre par sa structure légère, une mise en chauffe rapide des lieux en cas d'occupation intermittente par exemple. Les matériaux isolants sont également capables d'offrir de l'inertie. Par exemple, les fibres de bois ou la ouate de cellulose ont une masse volumique intéressante. L'inertie des isolants reste cependant moindre qu'une paroi lourde. Une structure en maçonnerie (ou en terre) sera capable de jouer ce rôle de tampon dans les apports internes et externes. Le béton a une capacité thermique de  $2\,500\text{ kJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$ , celle de la brique est de  $1\,800\text{ kJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$ , celle de la terre sèche est de  $1\,350\text{ kJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$  et celle de l'air, élément fondamental dans un isolant, est de  $1,3\text{ kJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$ .

Le graphique suivant permet de visualiser l'impact de l'inertie d'un bâtiment sur le confort thermique.

Le déphasage obtenu grâce à l'inertie d'un bâtiment peut intervenir de façon très temporaire (inertie horaire), sur une durée plus longue (inertie quotidienne) voire très longue (inertie séquentielle). L'inertie quotidienne permet de lisser les variations de température sur 24 heures. Si l'on cherche à stocker sur une période plus longue (dans les climats où les apports solaires se font rares sur plusieurs jours par exemple), on renforcera cette action de lissage en misant sur une inertie séquentielle forte. Le choix des matériaux dépend donc du climat, du mode d'occupation, des stratégies de chauffage et de l'effet attendu dans le bâtiment.

### 2.2.2 L'isolation

L'isolation d'un bâtiment permet de limiter la fuite de chaleur par conduction à travers la paroi en opposant une résistance thermique à ce flux de chaleur. Cette résistance thermique dépendra de la conductivité thermique du matériau et de son épaisseur. La conductivité thermique du matériau (en  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) mesure le flux de chaleur capable de traverser  $1\text{ m}^2$  de paroi sur  $1\text{ m}$  d'épaisseur lorsque de part et d'autre du matériau il existe  $1\text{ }^\circ\text{C}$  de différence. Donc, plus la conductivité du matériau est basse, plus il sera isolant. Plus son épaisseur sera grande, plus il apportera une résistance thermique importante. L'isolant limite les consommations énergétiques et apporte un confort dans le logement en limitant l'effet « parois froides ».

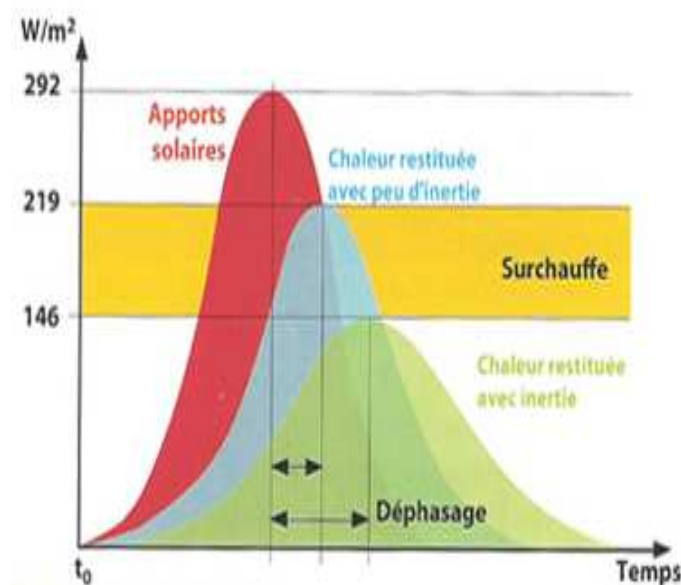


FIGURE 2.5: réactions d'un bâtiment face aux apports solaires - Source [7]

Un isolant constitué d'air immobile est performant. L'air immobile a en effet une conductivité égale à  $0,024 \text{ W/m.K}$ . Un bon isolant a une structure poreuse ou fibreuse dans laquelle des bulles d'air sont emprisonnées. En revanche, si l'isolant n'est pas protégé de part et d'autre, des flux d'air passe au travers de l'épaisseur du matériau. On peut comparer l'effet d'un isolant sur un bâtiment à un pull en laine sur une personne. La laine apporte une isolation confortable grâce à sa structure fibreuse, cependant, face à un courant d'air froid, la couche isolante perd de sa performance en laissant passer le flux d'air. De la même façon, un bâtiment peut subir des infiltrations et des exfiltrations d'air. Ces phénomènes réduisent l'effet isolant et comportent des risques de détérioration du matériau en raison de la vapeur d'eau transportée par l'air qui se condense au fur et à mesure qu'elle se refroidit. Nous détaillerons ce phénomène dans le paragraphe suivant.

L'isolant joue également un rôle sur le confort thermique à travers ses propriétés de stockage de la chaleur, de diffusivité thermique et de capacité hygrométrique. Les matériaux d'origine végétale, comme la fibre de bois ou la ouate de cellulose, ont par exemple une densité plus élevée et une capacité thermique plus grande que la laine minérale ou les composés dérivés du pétrole (polystyrène ou polyuréthane). Ils sont alors capables de ralentir dans le temps le passage de chaleur dans l'épaisseur de l'isolant. On dit qu'ils ont une diffusivité thermique plus faible que des laines minérales. Ils sont ainsi utiles pour le confort d'été, car ils apportent un déphasage des apports solaires. Cette situation est appréciable dans le cas de certaines parois (les rampants dans les combles aménagés, par exemple) ou dans le cas d'un logement composé de structures légères. Le tableau ci-après indique, en fonction de la nature de l'isolant, l'épaisseur optimale en hiver et l'épaisseur optimale en été permettant de considérer que la zone est en confort thermique. Ce tableau, issu d'études menées en Allemagne sur l'efficacité d'une isolation de toiture, a été établi par Samuel Courgey et Jean-Pierre Oliva ([7]).

|                                    | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | Conductivité (W/m.K) | Capacité thermique (Wh/m <sup>3</sup> .K) | Épaisseur hiver (m) | Épaisseur Été (m) |
|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Panneau isolant de fibres de bois  | 160                                  | 0,04                 | 80                                        | 0,173               | 0,185             |
| Liège expansé (vrac)               | 100                                  | 0,045                | 42                                        | 0,195               | 0,271             |
| Ouate de cellulose forte densité   | 70                                   | 0,045                | 42                                        | 0,195               | 0,271             |
| Ouate de cellulose moyenne densité | 55                                   | 0,04                 | 33                                        | 0,173               | 0,286             |
| Mousse rigide de polyuréthane      | 30                                   | 0,03                 | 13                                        | 0,13                | 0,405             |
| Perlite expansée                   | 90                                   | 0,05                 | 20                                        | 0,217               | 0,416             |
| Laine de mouton                    | 20                                   | 0,04                 | 10                                        | 0,173               | 0,535             |
| Polystyrène                        | 20                                   | 0,04                 | 8                                         | 0,173               | 0,593             |
| Coton                              | 25                                   | 0,04                 | 6                                         | 0,173               | 0,690             |
| Laines minérales                   | 18                                   | 0,04                 | 4                                         | 0,173               | 0,815             |
| Fibres polyester                   | 15                                   | 0,045                | 2                                         | 0,195               | 1,100             |

FIGURE 2.6: Epaisseur d'isolants nécessaires au confort thermique - Source [7]

Le choix fait en matière de construction résulte souvent d'un rapport résistance thermique / prix du matériau. Le bilan énergétique global du matériau (l'énergie grise, c'est-à-dire l'énergie liée à la production, au transport, à la mise en œuvre et au recyclage du matériau) est encore rarement pris en compte, le véritable coût environnemental d'un bâtiment étant pris en charge par l'ensemble de la société (par exemple l'impact des émissions de gaz à effet de serre liées à la production et au recyclage sera assumé par la collectivité). De la même façon, il est reconnu que certains matériaux peuvent avoir un impact sur la santé des ouvriers et des usagers mais le poids sur le système de santé est également porté par l'ensemble de la société. Nous pouvons citer deux dangers sanitaires portés par les isolants :

- En effet, les matériaux d'isolation sont issus de matières organiques ou contiennent de la matière organique, c'est-à-dire de la matière d'origine naturelle ou synthétique contenant du carbone. Les isolants d'origine végétales ou les isolants issus des transformations du pétrole contiennent, par essence, de la matière organique. Les isolants d'origine minérale, par définition, n'en contiennent pas sauf au travers des liants. Toute matière organique émet des composés organiques volatils (COV). Ces COV sont relargués dans l'air ambiant sous forme gazeuse pendant plusieurs mois. Il s'agit de l'émission primaire, liée à la seule

présence de la matière organique. Elle peut être évacuée par la ventilation si celle-ci est efficace. En général, cette émission est très forte après la fabrication et puis diminue au fur et à mesure. Mais certains matériaux peuvent émettre des COV pendant 1 an voire plus. Par ailleurs les matériaux organiques peuvent avoir des capacités d'adsorption, fixant ainsi des pollutions émises par d'autres sources. On parle d'émission secondaire : il y a réaction chimique entre l'adsorbant et la pollution adsorbée. En plus de ralentir le processus d'évacuation des COV, ce processus de pollution secondaire peut recontaminer l'air intérieur. Certains matériaux organiques naturels émettent très peu de COV (comme le liège, la laine, le bois de feuillus). Mais les traitements réalisés sur certains matériaux organiques ou minéraux initialement très faiblement émetteurs de COV peuvent transformer le produit en source de pollution. Citons par exemple les adhésifs pour fixer les parquets, les moquettes ou le linoléum, les plastifiants des revêtements, les liants des produits d'isolation, les résines conventionnelles des panneaux de particules, les produits utilisés pour traiter la porosité de certains fibres, les colles, les produits ignifuges et antitâches, les produits de traitement du bois, etc.

- Un isolant peut également constituer un danger par sa structure. Après l'affaire douloureuse de l'amiante, à l'origine de nombreuses victimes de fibroses pulmonaires et de cancers des voies respiratoires et digestives, et dont l'utilisation a été interdite en 1997 (bien que les effets étaient connus dès le début du 20ème siècle), le monde du bâtiment prend conscience des bombes à retardement que peuvent représenter les matériaux de construction et d'isolation. Des questions et des études (contradictoires pour certaines) traitent de la question de fibres liées aux matériaux de type laines minérales ou fibres céramiques réfractaires. La laine minérale fait partie de la famille des fibres minérales artificielles. Elle est élaborée à partir de sable (laine de verre) ou de basalte (laine de roche). Les fibres de ces laines ont des diamètres plus grands que ceux des fibres d'amiante, ce qui leur accorde une dangerosité moindre pour la santé humaine. En effet, le taux de pénétration dans l'organisme dépend notamment du diamètre de la fibre (nous le verrons dans la deuxième partie). Le diamètre géométrique moyen d'une fibre d'amiante est inférieur à 1 micron, celui d'une fibre de laine de roche et compris entre 2 et 3,5 micron et celui d'une fibre de laine de verre est compris entre 2 et 8 micron. Par ailleurs, d'après la directive européenne 97/69/CE transposée dans le droit français par l'arrêté du 28 août 1998, la bio-persistance des fibres serait inférieure au niveau classant les matières en substances cancérogènes. Les fibres de laine minérale sont donc plus rapidement éliminées par l'organisme que les fibres d'amiante. Pour autant, l'INRS (l'institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) insiste sur le fait que ce résultat indique aussi que certaines fibres de laine minérales sont classées en classe C3 (c'est-à-dire que ce sont des substances préoccupantes pour l'homme en raison d'effets cancérogènes possibles mais pour lesquelles les informations disponibles ne permettent pas une évaluation satisfaisante) et que lorsqu'elles sont inférieures à 3,5 microns, elles peuvent être inhalées et pénétrer profondément dans le poumon. Selon le cas rencontré, l'étiquetage permet à l'utilisateur de distinguer le type de danger auquel il s'expose (nous verrons l'étiquetage des matériaux dans la deuxième partie). L'INRS précise ainsi la marche à suivre pour la protection des salariés lors de la production, de la pose, de la découpe ou du retrait de laines minérales afin de limiter tout risque d'exposition entraînant des maladies respiratoires et des lésions et irritations cutanées.

Le danger sanitaire de l'isolant est présent à la fois pour le professionnel en charge de la fabrication ou de la pose et pour l'habitant, particulièrement si le matériau est en contact direct avec l'air intérieur. C'est le cas lorsque le matériau d'isolation n'est pas séparé par une enveloppe

étanche du volume intérieur (cas des constructions anciennes ou de constructions neuves dans lesquelles l'étanchéité à l'air aurait été dégradée, mal conçue ou mal mise en œuvre. En effet, un isolant encapsulé est un isolant qui ne diffuse pas de fibres ou de COV dans l'air ambiant. Etant donné l'importance accordée aujourd'hui à l'isolation, ces risques représentent un enjeu majeur. Pourtant, cet enjeu est complètement déconnecté des réglementations thermiques ou de la réglementation de ventilation.

### 2.2.3 Ponts thermiques, défauts d'isolation et risques de condensation

#### Les ponts thermiques

L'isolant d'une structure ne peut être continu. Chaque angle, changement de type de parois, menuiserie... génère une rupture d'isolant. Il s'agit d'un pont thermique. Ce dernier limite donc la résistance de l'isolation à cet endroit, voire, la supprime. La figure suivante représente un pont thermique lié à un plancher intermédiaire type dalle béton et un mur extérieur isolé par l'intérieur.

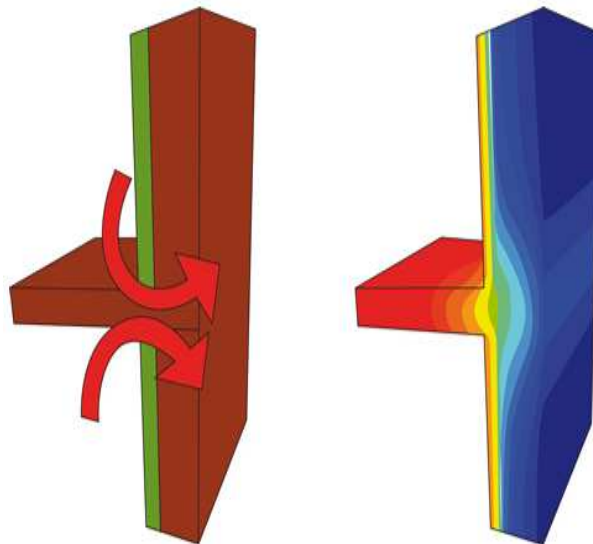


FIGURE 2.7: Exemple d'un pont thermique : liaison plancher intermédiaire - mur extérieur

Cette configuration est courante en France, où l'isolation par l'intérieur représente encore la grande majorité des constructions neuves. Il est possible de traiter ce pont thermique grâce à une planelle isolante si le mur extérieur est en brique isolante ou en parpaing. Si le mur est en béton, il faudra alors mettre en œuvre un rupteur de pont thermique. Avec le niveau BBC (Bâtiment Basse Consommation) demandé dans la RT2005 (équivalent du standard de la RT2012), la conception d'un bâtiment performant énergétiquement nécessite de prendre le temps de limiter au maximum ces défauts et de faire travailler les fabricants sur des solutions techniquement et économiquement réalisables. La recherche d'un niveau passif ou équivalent demande d'aller encore plus loin. Le bâtiment devient alors une boîte isolante.

#### Risques de condensation

Dans un logement, en dehors de l'eau contenue dans les canalisations, l'humidité est présente sous forme de vapeur d'eau contenue dans l'air et sous forme d'eau liquide, lorsque cette vapeur

d'eau se condense. Les humains dégagent de l'humidité par leur respiration et leur transpiration. Un adulte au repos relâche dans l'air ambiant entre 1 et 2,5 litres de vapeur d'eau par jour. Certaines activités domestiques génèrent également de l'humidité : le ménage, la cuisine, la vaisselle, la lessive, l'utilisation des appareils sanitaires. Dans la journée, pour une famille de 4 personnes, ces activités rejettent dans l'air ambiant entre 4 à 6 l de vapeur d'eau par jour. L'humidité peut également provenir de dégâts des eaux ou encore d'infiltrations au travers des parois.

L'humidité contenue dans l'air est souvent exprimée en pourcentage, c'est l'humidité relative de l'air. Il s'agit du rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de saturation de l'eau à la température et à la pression de l'air humide considéré. On exprime, par ce rapport, le contenu en vapeur d'eau de l'air par rapport à sa capacité maximale à en contenir. Plus la température de l'air humide est basse, moins il a de capacité à contenir de la vapeur d'eau. Le graphique ci-après est un diagramme de l'air humide simplifié, présentant l'humidité relative de l'air en fonction de l'humidité absolue, de la pression, et de la température.

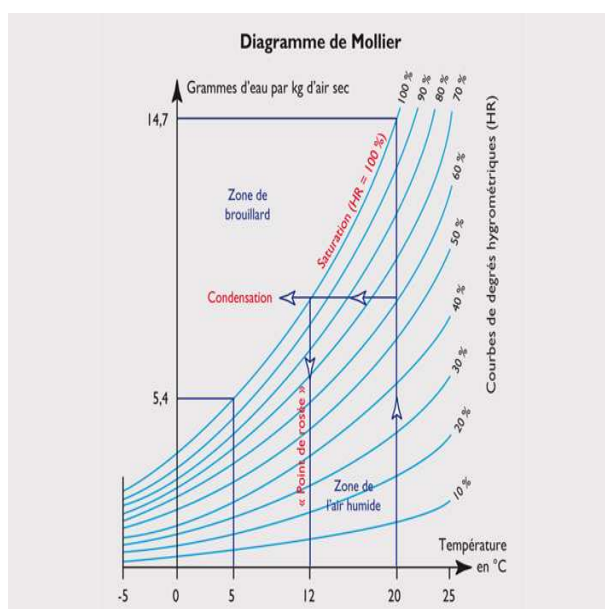


FIGURE 2.8: Diagramme de l'air humide simplifié

Si elle n'est pas évacuée au fur et à mesure, l'humidité présente dans le logement peut provoquer de gros dégâts. Ces risques sont accentués par les phénomènes de points froids (ponts thermiques) ou de parois froides (défauts d'isolation). En effet, si l'on se reporte au graphique précédent, pour une humidité relative de 60 %, dans un logement où l'air ambiant a une température de 20 °C, l'atmosphère n'est pas saturée en humidité. Lorsque l'air passe à 12 °C, l'air devient saturé en vapeur d'eau, cette dernière se condense. Lorsqu'elle se condense sur les parois, elle risque de dégrader les matériaux de construction. Certains isolants n'auront plus les mêmes propriétés thermiques après avoir été en contact avec l'eau liquide (citons le cas des laines minérales). Autre conséquence : un milieu humide est idéal pour le développement de moisissures, de bactéries et d'acariens. Le risque devient donc sanitaire.

Lorsqu'un pont thermique est traité, ou lorsque l'isolant est posée de façon parfaitement continue, cela présente trois avantages importants pour l'utilisateur :

- la diminution des consommations énergétiques par une réduction des déperditions de l’enveloppe,
- le confort thermique amélioré par l’élimination de points froids sur la paroi,
- la réduction des points froids, facteurs de développement de l’humidité et des risques de moisissures.

## 2.2.4 L’étanchéité à l’air et la perméance à la vapeur d’eau

### L’étanchéité à l’air

Une paroi verticale ou horizontale est soumise à des différences de pression entre l’intérieur ou l’extérieur. Ces différences de pressions, liées à la pression du vent sur les parois ainsi qu’aux différences de température, peuvent laisser passer l’air depuis l’extérieur vers l’intérieur et depuis l’intérieur vers l’extérieur, ceci dans les parois, entre les parois, entre les menuiseries et les parois, aux passages des canalisations, de manière générale dès qu’il apparaît une rupture dans la continuité des matériaux. Chaque point de fuite peut avoir des conséquences sur les consommations énergétiques, sur la pérennité du bâtiment et sur la santé des usagers.

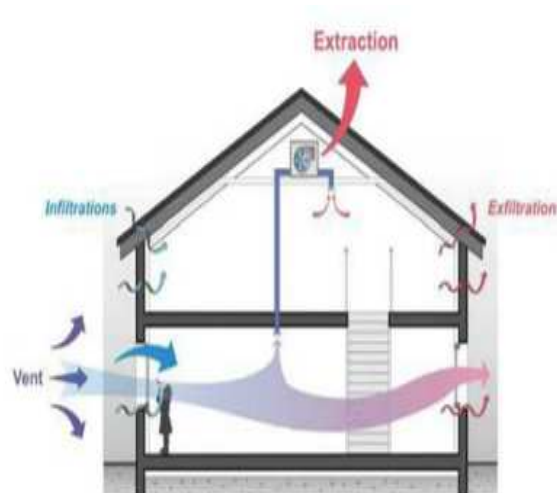


FIGURE 2.9: Infiltrations et exfiltrations d’air dans un bâtiment

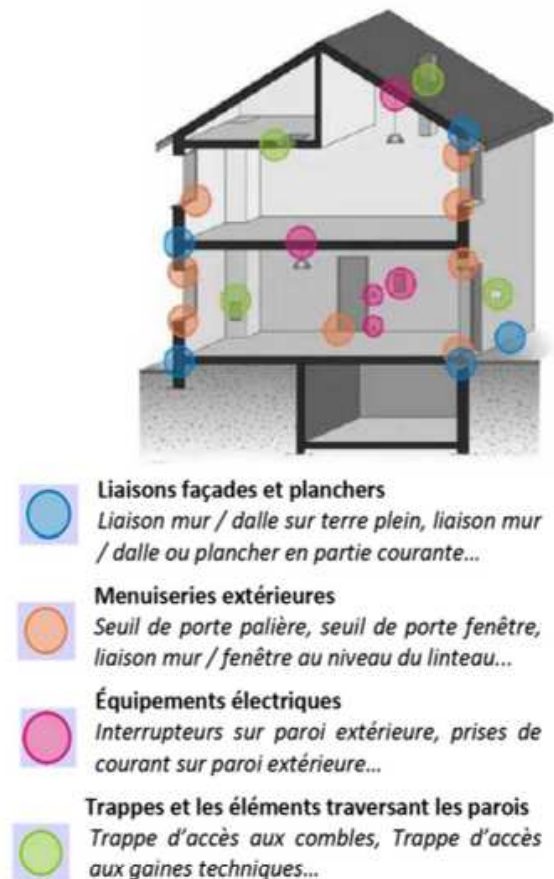


FIGURE 2.10: Les points de fuites dans un bâtiment

Du point de vue énergétique, « une maison d'une surface habitable de 80 m<sup>2</sup> qui présente des fuites dans l'étanchéité à l'air, le chauffage nécessite une quantité d'énergie aussi grande que pour une maison étanche à l'air d'une surface habitable d'environ 400 m<sup>2</sup> » (Source Proclima). L'institut allemand de physique du bâtiment a réalisé des mesures sur un bâtiment dont la température intérieure est de 20 °C, dans un environnement où la température extérieure est de - 10 °C et où la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur est de 20 Pa (force du vent de 2 à 3 Beaufort). Le bâtiment est protégé par une couche de 14 cm d'isolant. Une fente de 1 mm de largeur sur 1 m de hauteur dans le système d'étanchéité à l'air intérieur soumise à un vent de 30 km/h entraîne 4,8 fois plus de pertes de chaleur que l'ensemble de la surface d'isolation.



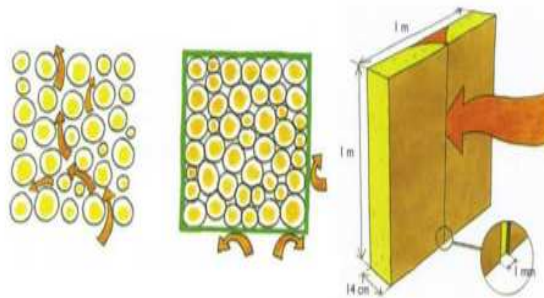


FIGURE 2.11: Flux d'air dans un isolant

La question de l'étanchéité à l'air des bâtiments n'est que récemment prise en charge en France, contrairement à nos pays voisins nordiques chez lesquels les températures d'hiver ont incité à avancer sur ce problème depuis les deux chocs pétroliers. La réglementation thermique française de 2005 n'était pas particulièrement contraignante. La valeur par défaut de la perméabilité à l'air était fixée à  $1,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  de parois froides sous 4 Pa (contre  $0,16 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  de parois froides sous 4 Pa pour un bâtiment passif) et aucun contrôle n'était obligatoire sur le bâtiment livré. Le label BBC effinergie a permis de fixer des premiers objectifs intéressants énergétiquement en imposant une valeur de perméabilité maximale plus basse ( $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  de parois froides sous 4 Pa pour les logements collectifs et  $0,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  de parois froides sous 4 Pa pour les logements individuels), ainsi qu'un test de perméabilité à l'air obligatoire en fin de chantier. On constate aujourd'hui que les magasins de produits de construction commencent à ouvrir leur rayon de produits d'étanchéité à l'air, que les professionnels du bâtiment se forment et que les cahiers des charges de construction intègrent ces exigences.

Nous avons réalisé des simulations grâce au moteur de calcul réglementaire Climawin dans le cas d'un logement d'une surface de  $100\text{m}^2$ . Deux systèmes de ventilation sont testés : une ventilation simple flux de type hygroréglable B et une ventilation double flux. Dans un cas, la perméabilité à l'air du logement est égale à  $1,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  sous 4 Pa (valeur par défaut dans la RT2005), dans le second cas, elle est égale à  $0,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  sous 4 Pa (valeur exigée pour le label BBC). Le prix du combustible est de 10 centimes d'euros par kWh et l'inflation attendue sur ce combustible est de 8% par an. Le tableau suivant présente, selon le moteur de calcul, les économies annuelles attendues la première année ainsi que la somme des économies réalisées sur 10 ans.

| Système de ventilation | Perméabilité à l'air (m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> sous 4 Pa) | Consommation chauffage (kWh/an) | Economies annuelles (€ TTC) | Economies sur 10 ans (€ TTC) |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Simple flux hygro B    | 1,7                                                               | 1350                            | 40                          | 670                          |
| Simple flux hygro B    | 0,6                                                               | 900                             |                             |                              |
| Double flux            | 1,7                                                               | 440                             | 32                          | 535                          |
| Double flux            | 0,6                                                               | 120                             |                             |                              |

FIGURE 2.12: Economies réalisées en passant d'une perméabilité à l'air de 1,7 à 0,6 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup> sous 4 Pa

### La perméance à la vapeur d'eau

Avec la question de l'étanchéité à l'air vient la problématique de la diffusion de vapeur d'eau au travers des parois. L'air ambiant contient de la vapeur d'eau. Un écart de pression de vapeur existe entre l'intérieur du logement et l'extérieur dans l'ensemble de l'épaisseur de l'isolant. Cet écart dépend de l'humidité relative et de la température de l'air. La pression est généralement plus forte du côté chaud de l'isolant, c'est là où l'écart de pression entre les deux côtés de la paroi d'une cellule d'isolant est plus grand. Au fur et à mesure que les températures baissent, cet écart de pression diminue. Pour être en équilibre, la vapeur d'eau va se déplacer progressivement vers le côté froid, où la pression de vapeur est moins forte, traverser l'isolant et sortir de l'épaisseur si rien ne l'en empêche. Elle se déplace selon deux principes :

- par convection, avec les flux d'air par les défauts d'étanchéité à l'air,
- par diffusion moléculaire, à travers le matériau, si aucune paroi n'a la capacité de la freiner.

Lorsque la vapeur d'eau s'infiltre dans la paroi, au fur et à mesure qu'elle rencontre des températures froides, elle se condense. Un problème non négligeable se pose : si une couche de la paroi oppose une résistance à la diffusion de vapeur d'eau et qu'elle se trouve du côté froid de l'isolant (cas d'un panneau OSB ou d'un bac acier), à son contact la vapeur d'eau va

complètement se condenser et va rester bloquée sur cette paroi. Bien que cette situation soit à éviter, si l'isolant a des capacités hygrothermiques, il saura, *dans une certaine limite*, contenir l'eau et en été, la vapeur d'eau migrera dans l'autre sens (il fera plus chaud à l'extérieur qu'à l'intérieur) sans dégrader l'isolant. Mais si l'isolant n'a pas cette propriété, il sera dégradé, perdra ses capacités thermiques et, pire, sera le siège de moisissures.

La perméance à la vapeur d'eau est donc tout aussi importante à prendre en compte que l'étanchéité à l'air :

- pour des questions d'économie d'énergie (résistance thermique du matériau isolant conservée, mur sec),
- pour des questions de pérennité du bâti,
- et pour des questions de santé des occupants.

« Une interstice entre deux plaques de plâtre peut laisser pénétrer, par convection, 800 g/m<sup>2</sup> d'humidité durant une journée d'hiver, alors qu'un pare-vapeur hygrorégulant rapporté, ne laissera pénétrer que 5 g/m<sup>2</sup> » (Source : Proclima)

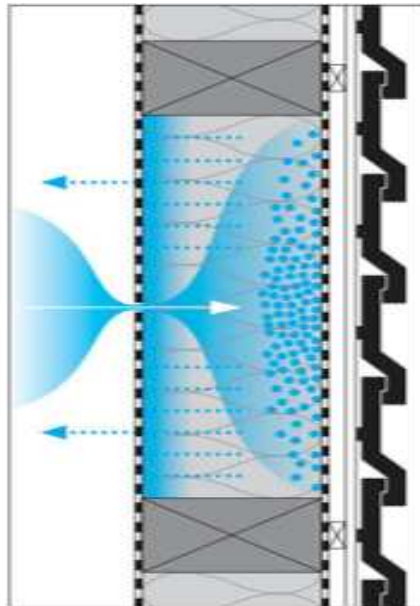


FIGURE 2.13: Passage de la vapeur d'eau contenu dans l'air à travers un isolant lors d'un défaut d'étanchéité à l'air

Une bonne conception de l'étanchéité à l'air et de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau permettent donc de limiter les risques sanitaires en évitant le développement de moisissures dans la paroi et en supprimant le contact direct entre l'isolant et l'air intérieur. Cependant, la question de l'impact des matériaux d'étanchéité à l'air sur la qualité de l'air reste entière. Citons par exemple le cas de la mousse de polyuréthane. Elle peut être utilisée pour combler des trous, autour de câbles pénétrant dans l'enveloppe par exemple. Cette mousse, au-delà de sa moindre efficacité d'étanchéité par rapport à d'autres produits, émet des COV tels que le toluène diisocyanate. Ce composé n'a pas d'effet cancérigène prouvé, mais s'avère toxique pour le système respiratoire et le système nerveux. Il convient donc de porter une attention particulière sur le choix de ces types de matériaux.

### 2.2.5 l'environnement extérieur

Un bâtiment doit se concevoir avant tout avec son environnement extérieur.

L'orientation du bâtiment va désormais être prise en compte dans le calcul de la réglementation thermique 2012 au travers du coefficient de bioclimaticité (appelé « BBio »). Le principe est de favoriser les apports solaires gratuits en hiver pour limiter les besoins de chauffage tout en évitant les surchauffes en été. Pour y parvenir, l'orientation optimale en France est le Sud. La course du soleil est présentée dans les schémas ci-après. On observe ainsi qu'en hiver, le soleil est bas et a une course réduite du Sud-Est au Sud-Ouest. Les apports énergétiques et la luminosité se feront principalement au travers des vitrages de la façade Sud. En mi-saison, le soleil a une course plus longue, sa position est plus haute dans le ciel. Les apports sont néanmoins toujours maximisés sur les façades Sud. Une protection mobile permet de les limiter en cas de température extérieure et intérieure suffisamment élevées. En été, le soleil se lève au Nord-Est et se couche au Nord-Ouest. Sa trajectoire est plus haute dans le ciel. Ainsi, au moment chaud de la journée, sur les façades Sud, un recul de la fenêtre ou une casquette permettent de limiter les surchauffes. En revanche, les vitrages situés à l'Est et à l'Ouest seront touchés par un soleil bas sur une durée suffisamment longue pour entraîner des surchauffes.

Nous avons évalué l'impact de l'orientation sur les consommations de chauffage à travers une modélisation de différents bâtiments d'habitation. Une orientation des façades principales à l'Est ou à l'Ouest entraîne des surconsommations énergétiques de l'ordre de 10 à 15%, une orientation des façades principales au Nord entraîne des surconsommations énergétiques de l'ordre de 15 à 20%.

D'autres facteurs extérieurs impactent la conception du bâtiment :

- l'exposition au vent lorsqu'on cherche à limiter les courants d'air ou à concevoir une ventilation naturelle (nous reviendrons sur ce point dans la partie dédiée aux systèmes de ventilation),
- les nuisances sonores qui peuvent être plus ou moins amorties par les matériaux de l'enveloppe (parois, vitrages) et par les types d'entrées d'air,
- les pollutions extérieures, peu souvent prises en compte par les équipes de maîtrise d'œuvre dans la réflexion de l'amenée d'air neuf dans le logement. Nous étudierons cette question dans la partie dédiée aux polluants.

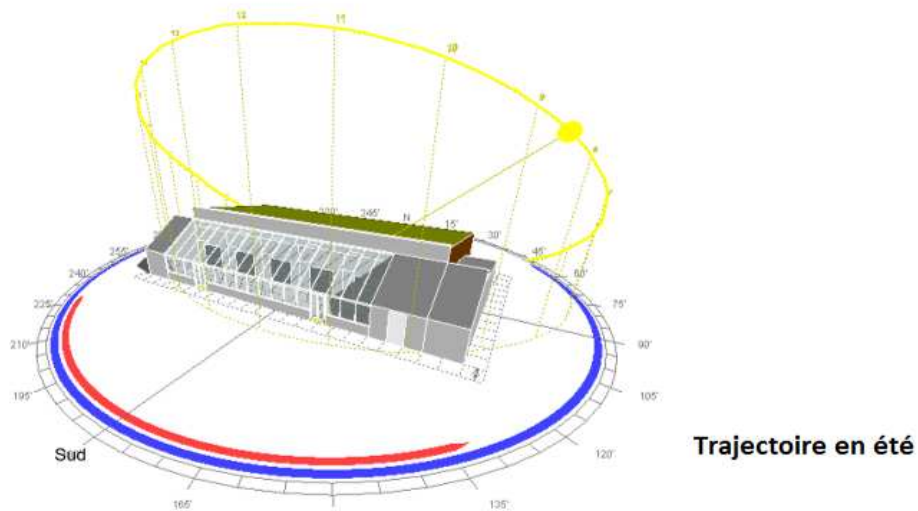
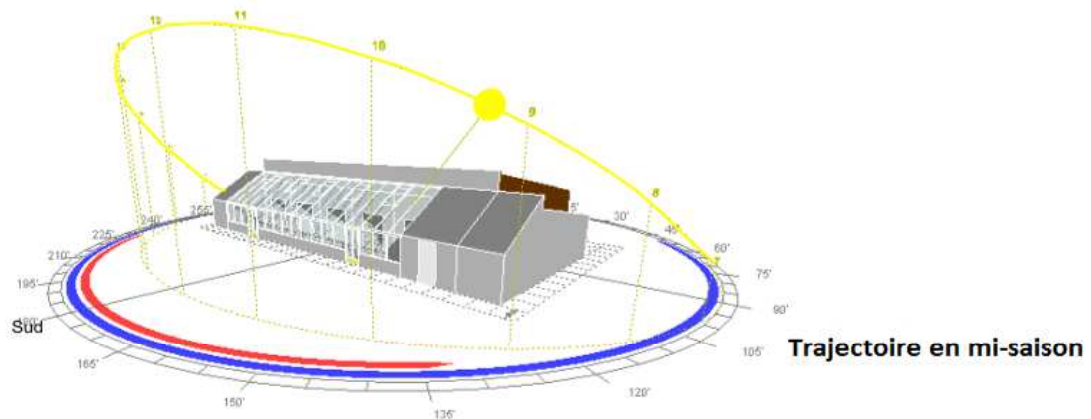
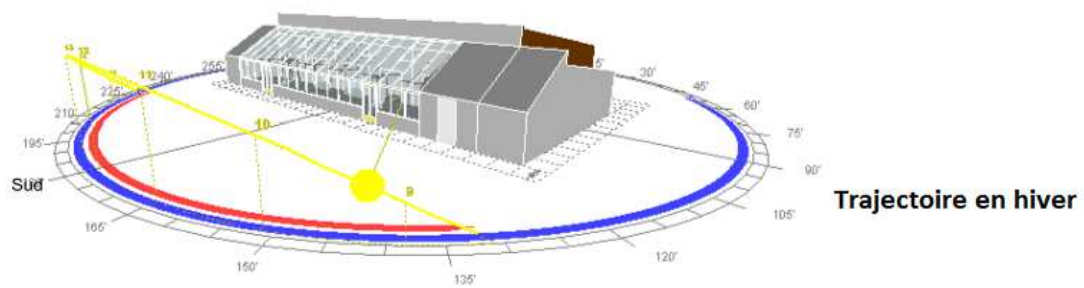


FIGURE 2.14: Course du soleil en fonction des saisons



## Chapitre 3

# Polluants et santé dans les logements

L'air que nous respirons à l'intérieur comme à l'extérieur est composé de plusieurs éléments. La figure suivante illustre les différents composants présents dans l'air atmosphérique.

| Air Sec                                  |         | Humidité        |                                      | Pollution  |
|------------------------------------------|---------|-----------------|--------------------------------------|------------|
| l'azote (N <sub>2</sub> )                | 78%     | la vapeur d'eau | L'eau liquide<br>(brouillard, pluie) | poussières |
| l'oxygène (O <sub>2</sub> )              | 21%     |                 |                                      | fumées     |
| les gaz suivants                         | 0,00..% |                 |                                      | pollen     |
| le dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) |         |                 |                                      | bactéries  |
| l'hélium (He)                            |         |                 | virus                                |            |
| le néon (Ne)                             |         |                 | fibres                               |            |
| le méthane (CH <sub>4</sub> )            |         |                 | L'eau solide (givre,<br>neige)       | COV        |
| le dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )  |         |                 |                                      |            |
| le dihydrogène (H <sub>2</sub> )         |         |                 |                                      |            |
| l'ozone (O <sub>3</sub> )                |         |                 |                                      |            |
| le krypton (Kr)                          |         |                 |                                      |            |
| autres gaz rares                         |         |                 |                                      |            |
| ← Air humide →                           |         |                 |                                      |            |
| ← Air humide insaturé →                  |         |                 |                                      |            |
| ← Air humide sursaturé →                 |         |                 |                                      |            |

FIGURE 3.1: Composition de l'air

La qualité de l'air intérieur est caractérisée par différents éléments comme les caractéristiques physiques des polluants, les émissions chimiques, la biocontamination. Un adulte respire environ 15 m<sup>3</sup> d'air par jour soit environ 20 kg. C'est donc par les voies respiratoires que les bactéries, moisissures, agents pathogènes, particules... contenus dans notre logement sont le plus rapidement en contact avec nos organes. Ces pollutions présentes dans un logements sont variées, elles

peuvent provenir :

- des matériaux présents dans le logement, à savoir, l’enveloppe du bâtiment, le mobilier, les équipements qui contiennent des composés organiques volatils (en particulier le fameux formaldéhyde), des fibres, etc ;
- des appareils de combustion domestiques qui produisent du monoxyde de carbone et du dioxyde d’azote et diffuse dans l’air ambiant des particules fines ;
- de certains équipements réputés pour assainir l’air intérieur comme les épurateurs d’air qui peuvent s’avérer dangereux de part leurs émissions d’ozone ;
- des activités humaines : la respiration, le ménage, la cuisine, la douche... dégageant de l’humidité, du CO<sub>2</sub>, le bricolage dégage des particules, les déchets ménagers attirent les blattes, les produits ménagers émettent des COV et des produits chimiques toxiques, la fumée de tabac relargue COV, poisons et particules ;
- des animaux pouvant représenter une source allergène ;
- des plantes qui pour certaines peuvent également être des sources allergènes et qui développe des spores ;
- de la poussière, nid pour les acariens ;
- des déchets organiques sources d’alimentation pour des insectes comme les blattes, grand vecteur pathogène ;
- du transfert de pollution de l’extérieur vers l’intérieur transportant des spores, des pollen, des pesticides, des particules, etc. Il peut avoir lieu par le système de ventilation et/ou au travers de la paroi. Si le système de ventilation dispose de filtres adéquat à la pollution extérieure, il permettra de réduire cette présence dans le logement, tout comme une enveloppe étanche à l’air permettra de limiter ces risques de diffusion de polluants dans l’espace intérieur. Au cours de ces dernières décennies, de nombreux travaux ont vu le jour et ont permis d’avancer dans la protection des personnes vis-à-vis de la pollution atmosphérique. En France, des structures de contrôle de la qualité de l’air extérieur ont vu le jour. Nous savons qu’en moyenne, nous passons 80% de notre temps en lieu clos. Dès lors, quel impact peut avoir cette qualité de l’air extérieur sur notre santé ?





FIGURE 3.2: Les sources de pollutions de l'air intérieur

Cette variété de sources de pollutions de l'air intérieur en fait un sujet difficile à étudier puisque ces pollutions dépendent de différents facteurs (saisons, localisations géographiques, habitudes, durée d'exposition, etc.) et de différentes combinaisons de ces facteurs. Par ailleurs, l'impact sur la santé est parfois difficile à évaluer, il n'est pas toujours évident de comprendre les relations dose-effet d'un polluant au travers des études épidémiologiques.

La population est maintenant plutôt bien informée sur les questions de la pollution extérieure et elle est même plus sensibilisée à cette pollution qu'aux risques liés à la pollution intérieure. Cependant, il est dans les croyances de beaucoup de considérer que les murs protègent de la pollution atmosphérique et un usager n'est pas nécessairement conscient que le confinement dans un espace clos est également source de danger pour la santé. Mais l'enjeu est tel que des principes de précautions commencent à se mettre en place et que les politiques publiques se saisissent peu à peu du problème.

### 3.1 Effets et études épidémiologiques

Les polluants de l'air intérieur peuvent agir sur la santé humaine selon deux principes : les effets à court-terme et les effets à long-terme. A court-terme, le problème de santé peut se prononcer à la suite d'une seule exposition ou sur des expositions répétées. Le problème peut alors être pris en charge, s'il est identifié. La difficulté peut être de dissocier les irritations et les infections des voies dues à une pollution de l'air intérieur et celles dues à une maladie virale. A long-terme, les effets n'apparaissent qu'après une longue période d'exposition continue ou pas.

Dans ce cas, les effets peuvent être graves (cancers, obstruction des voies respiratoires, infections des voies respiratoires chroniques, anorexies).

Rappelons qu'il peut y avoir une association faite dans des études épidémiologiques, même si la relation ne peut pas encore être établie. La différence entre une relation (définition causale) et une association (définition statistique) est la suivante : l'existence d'une association statistique, spatiale ou temporelle entre une exposition et un événement de santé ne signifie par qu'il existe une relation de cause à effet entre l'exposition et l'événement de santé. On parle de facteur de risque qui est associé de manière statistiquement significative à un événement de santé. Pour qu'une relation soit établie sur les effets néfastes d'un agent, il faut que les éléments de preuve convergent selon certains critères et qu'ils soient suffisamment impactants du point de vue des connaissances scientifiques. Une grande difficulté dans l'évaluation des effets sur des études toxicologiques ou épidémiologiques réside dans l'évaluation de l'exposition. Comme nous avons pu le voir plus haut, il existe dans le logement une grande variété de polluants, leurs intensités est variable dans le temps et d'un environnement à l'autre. La population concernée ne réagit pas de la même façon aux différents polluants (personnes âgées, femmes, hommes, sensibilité...). Lors d'une exposition à un polluant, on détermine deux types de relations : la relation dose-effet et la relation dose-réponse.

La relation dose-effet est relative à la gravité de l'effet toxique en fonction de l'exposition. La dose d'exposition est donc importante. On parle d'effets déterministes, c'est-à-dire d'effets à seuil de dose qui ne surviennent que si une dose est atteinte.

La relation dose-réponse traite des effets sans seuil de dose. Elle indique la fréquence de survenue d'un effet en fonction de l'exposition. On parle d'effets stochastiques, ils apparaissent quelque soit la dose reçue mais leur probabilité croît avec l'intensité de l'effet.

C'est sur la base de ces deux types de relation que sont établies les valeurs toxiques de référence (VTR). Pour un effet à seuil de dose, la VTR correspond à la quantité théorique d'un polluant pouvant être inhalée par un sujet sans conséquence sur sa santé. Cette VTR est exprimée en  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Pour un effet sans seuil de dose, la VTR représente un excès de risque, c'est-à-dire la différence entre le risque chez le groupe exposé et le groupe de référence. Cette VTR est exprimée en  $(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$ .

## 3.2 Comportement d'un polluant

Il n'est pas évident de prédire le comportement d'un polluant à l'intérieur d'un logement. Le polluant est transporté dans différents espaces par des courants d'air liés à la ventilation mécanique ou naturelle ainsi que par les déplacements des personnes. Certains polluants comme les particules ont tendance soit à se déposer, soit à se remettre en suspension en fonction de leur taille et de leur forme ainsi qu'en fonction des flux d'air en présence. L'air a tendance à s'homogénéiser lorsque la ventilation balaye tout l'espace du point d'entrée d'air au point d'extraction. Nous verrons plus loin, lors de la comparaison des systèmes de ventilation, que c'est précisément ce principe de balayage qui peut être mis en défaut.

Lorsque le polluant passe à proximité de surfaces, il peut y avoir une adsorption de ce polluant par le matériau de cette surface. Cette adsorption a plusieurs conséquences : ralentissement de l'évacuation du polluant et risque de réaction chimique avec ce matériau créant alors un nouveau composé chimique qui peut s'avérer dans certains cas plus dangereux encore. On parle

| Substances                          | VTR à seuil                        | VTR sans seuil                            |
|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|
| <u>Aldrine</u> (insecticide chloré) | $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ mg/m}^3$ | $(4,9 \cdot 10^{-3} \text{ mg/m}^3)^{-1}$ |
| Benzène (COV)                       | $0,0102 \text{ mg/m}^3$            | $(2,9 \cdot 10^{-5} \text{ mg/m}^3)^{-1}$ |
| Formaldéhyde (COV)                  | $3 \cdot 10^{-3} \text{ mg/m}^3$   | $(5,1 \cdot 10^{-4} \text{ mg/m}^3)^{-1}$ |
| Toluène (COV)                       | $0,3 \text{ mg/m}^3$               |                                           |

FIGURE 3.3: Exemples de valeurs toxiques de référence

de pollution secondaire. A l'inverse, lorsque le matériau relargue un polluant à sa surface par réaction chimique, on parle de désorption.

Un matériau pollue également par émission. L'émission correspond à une émission de gaz ou de vapeur du matériau. La désorption et l'émission sont accentuées par la convection en surface et donc par les débits d'air en présence.

Le polluant ne voyage pas que par les voies aériennes. Il a tendance à utiliser la diffusion au travers des matériaux poreux du bâtiment, ralentissant encore l'évacuation du polluant de l'intérieur du logement.

### 3.3 L'humidité

#### 3.3.1 Un problème souvent présent dans les logements

Comme nous avons pu le voir dans la première partie de ce rapport, dans un logement, en dehors de l'eau contenue dans les canalisations, l'humidité est présente sous forme de vapeur d'eau contenue dans l'air et sous forme d'eau liquide, lorsque cette vapeur d'eau se condense. Comme précisé dans le chapitre précédent sur les risques de condensation, l'humidité provient de plusieurs phénomènes (respiration et transpiration des occupants, activités domestiques, dégâts des eaux, infiltrations) dans des proportions non négligeables.

En atmosphère saturée d'humidité, l'eau en suspension est de  $3 \text{ l/m}^3$ . Dans un logement, l'humidité doit être évacuée au fur et à mesure. Elle ne doit ni faire défaut, ni être présente en trop grande quantité. Entre 45 % et 65 %, elle permet d'avoir une atmosphère saine et confortable. Un air trop humide est source de pollution (développement de moisissures, d'acariens, etc.), un air trop sec fragilise l'organisme.

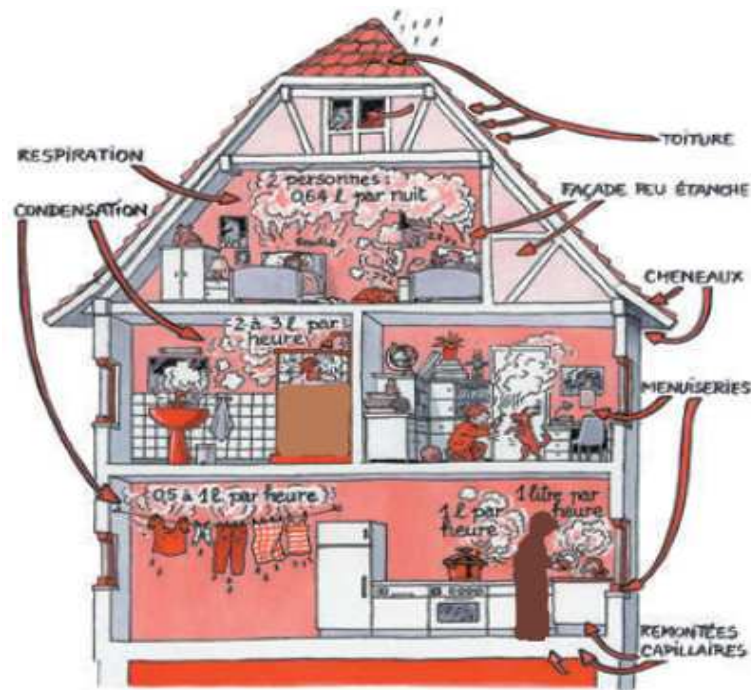


FIGURE 3.4: Les sources d'humidité dans un logement

L'institut national de la statistique et des études économiques a publié deux enquêtes « Logement » en 2002 et en 2006 [6] et [3] dans lesquelles ressortaient très clairement le problème de l'humidité dans les logements. Selon ces deux enquêtes, l'humidité visible sur les murs, reste la première nuisance créant un inconfort dans les habitations. En 2002, Hélène Chesnel, rédactrice du rapport, indiquait que « un quart des ménages ont déclaré que des signes d'humidité apparaissaient sur certains murs de leurs logements. Ce problème vient très nettement en tête ». Bénédicte Castéran et Layla Ricroch constatent qu'en 2006, cette part a légèrement diminué. En effet, « seulement » 20,4 % des ménages interrogés subissent ce problème. Globalement, un ménage sur cinq souffre de problème d'humidité apparente.

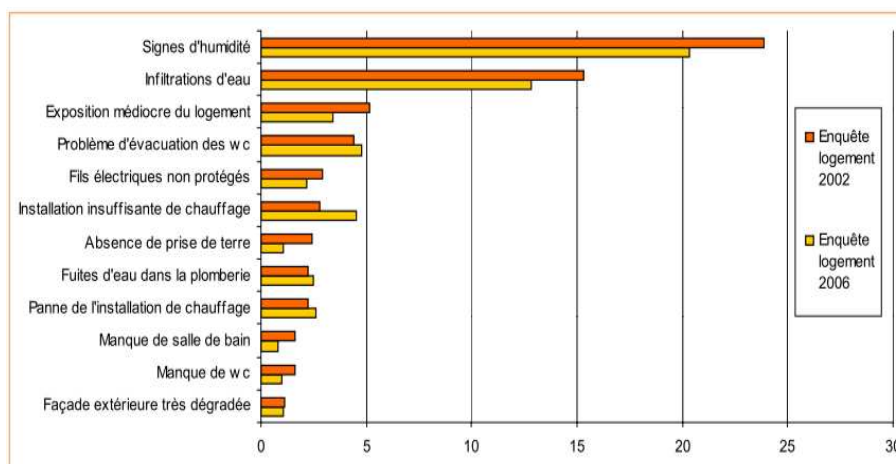


FIGURE 3.5: Résultats des enquêtes logements menées par l'INSEE en 2002 et 2006 sur les principaux défauts dans les logements

Ces enquêtes font le point sur les caractéristiques du bâtiment enquêté. Les logements humides présentent souvent des défauts sur les éléments en contact avec l'extérieur (état des fenêtres et des revêtements de façades allant de moyen à mauvais). Le tableau suivant explique certainement une partie de la baisse du nombre de logements humides entre 2002 et 2006. En effet, selon le commissariat général au développement durable « Ce lien entre signe d'humidité à l'intérieur du logement et présence d'humidité à l'extérieur explique en partie le recul de la proportion de logements humides observé entre 2002 et 2006. En effet, pour l'enquête de 2002, les ménages avaient été interrogés fin 2001, année où les précipitations avaient été abondantes sur une bonne partie du pays. L'enquête 2006, en revanche, a été menée après une période marquée par des précipitations largement déficitaires, notamment en 2005. »

L'enquête révélait également que les logements équipés de chauffage électrique subissent plus souvent ces problèmes d'humidité. Nous n'en savons malheureusement pas plus sur ce point : est-ce un problème de coût de l'énergie (si, en raison du coût de l'électricité, le logement est moins chauffé, la vapeur d'eau se condensera plus rapidement, notamment sur les parois), est-ce un problème d'efficacité du système d'émission (température de l'air non uniforme et plus basse dès que l'on s'éloigne du système d'émission), est-ce une typologie de logement en particulier (les années 70 et 80 ont vu une grande vague de chauffage électrique, or le tableau indique aussi que ces années font partie des années pour lesquelles on retrouve bien souvent les logements plus humides - probablement en raison de l'enveloppe vieillissante, de l'absence de système de ventilation et / ou du manque d'isolation).

Les résultats des enquêtes « Logement » ont également permis de retracer les difficultés et les incidents structurels vécus dans les logements. Les ménages vivant une situation socio-économique difficile sont plus touchés que les autres ménages par les incidents décrits dans cette

En %

|                                             |             | 2002 | 2006 |
|---------------------------------------------|-------------|------|------|
| <b>Date d'achèvement de la construction</b> | avant 1948  | 33,8 | 30,9 |
|                                             | 1949 - 1974 | 23,1 | 19,6 |
|                                             | 1975 - 1981 | 16,5 | 15,2 |
|                                             | 1982 - 1989 | 17,5 | 14,2 |
|                                             | 1990 - 1998 | 13,3 | 13,5 |
|                                             | après 1999  | 7,0  | 6,2  |
| <b>État du revêtement de la façade</b>      | très bon    | 13,1 | 10,8 |
|                                             | bon         | 19,0 | 17,0 |
|                                             | moyen       | 30,2 | 25,3 |
|                                             | médiocre    | 44,2 | 38,3 |
|                                             | mauvais     | 59,2 | 49,3 |
| <b>Infiltration d'eau</b>                   | oui         | 46,1 | 41,6 |
|                                             | non         | 19,8 | 17,2 |
| <b>État des fenêtres</b>                    | bon         | 17,6 | 15,7 |
|                                             | moyen       | 30,4 | 25,8 |
|                                             | mauvais     | 47,8 | 45,1 |
| <b>Problème de chauffage</b>                | oui         | 48,1 | 36,4 |
|                                             | non         | 21,4 | 17,3 |
| <b>Chauffage supplémentaire</b>             | oui         | 27,6 | 23,3 |
|                                             | non         | 21,6 | 18,7 |
| <b>Ensemble</b>                             |             | 23,9 | 20,4 |

FIGURE 3.6: Caractéristiques des logements humides dans les enquêtes logements menées par l'INSEE en 2002 et 2006 sur les principaux défauts dans les logements

enquête (ce résultat reste vrai pour la question de l'humidité). Ainsi, les étudiants, les chômeurs, les familles nombreuses (dans le cas de logements surpeuplés) et les familles monoparentales subissent plus souvent ce phénomène. Le nombre de personnes présentes dans le logement en comparaison à la taille du logement a un impact sur l'humidité dégagée dans le logement et pose question sur le dimensionnement des systèmes de ventilation actuels en logements sociaux. Il est également intéressant de constater que si les occupants du logement sont là en journée (personnes non actives), les problèmes liés à l'humidité sont moindres. Nous pouvons relier ce dernier point à la régulation du chauffage en journée en cas d'absence des occupants et certainement à la possibilité pour des personnes présentes dans le logement de ventiler naturellement par ouverture des fenêtres lorsque le système de ventilation est défaillant ou absent.

Ce type d'enquête ou d'investigation dans des logements a été mené dans d'autres pays : au Canada, aux Etats-Unis, aux Pays-Bas, en Finlande. Selon un article de Sivasubramani & al [24], en Amérique du Nord, on retrouve une forte présence de moisissure dans 36 % des bâtiments et en Finlande et aux Pays-Bas, 15 à 24 % des immeubles sont humides.

### 3.3.2 L'humidité, source de développement des moisissures

Les signes d'humidité sont souvent détectés physiquement par des moisissures. Les moisissures sont des champignons microscopiques (de 1 à 200  $\mu\text{m}$ ) et regroupent des milliers d'espèces. Leur habitat naturel est l'extérieur. Elles proviennent de matières organiques comme les plantes, les feuilles ainsi que le sol et la surface de l'eau stagnante lorsqu'une matière organique est en décomposition. Elles libèrent des spores (de 2 à 200  $\mu\text{m}$ ) qui sont aéroportées ou transportées par des humains ou animaux. Ces spores, selon l'espèce, peuvent résister à des conditions climatiques



rudes. Le tableau ci-après présente les degrés de résistances aux conditions environnementales en fonction du type de spores.

| Exemples d'espèces concernées                                                                                   | Condition environnementale                                           | Seuil de résistance          | Durée de la viabilité                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Ascospores de <i>Byssoschlamys fulva</i> ; <i>Neurospora</i> sp                                                 | Chaleur très élevée                                                  | 90°C (feux de forêt)         | Quelques mois                                                                      |
| Plusieurs espèces d'Amérique du Nord                                                                            | Froid intense                                                        | Congélation                  | Un hiver                                                                           |
| La majorité des genres de l'environnement intérieur : <i>Aspergillus</i> , <i>penicillium</i> , <i>eurotium</i> | Sécheresse de l'air                                                  | + / - 0% d'humidité relative | Semaine à années                                                                   |
| Eurotium sp                                                                                                     | Présence d'humidité dans le milieu sur lequel se déposent les spores | 0 à 50% d'humidité           | Jusqu'à des années                                                                 |
|                                                                                                                 |                                                                      | Plus de 50% d'humidité       | A ces taux, les spores devraient germer. Dans le cas contraire, elles pourrissent. |

FIGURE 3.7: Exemple d'espèces de moisissures, leurs conditions environnementales et conditions limites (Source : Les risques à la santé associés à la présence de moisissures en milieu intérieur - Etude menée par la Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels et le Laboratoire de santé publique du Québec pour l'Institut national de santé publique du Québec)

La concentration des spores entre l'intérieur et l'extérieur est liée. Lorsqu'elles arrivent en milieu clos, ces spores se déposent sur les surfaces (matériaux inertes comme le plancher, les tapis, les rebords de fenêtre, la colle, les textiles, le papier peint, etc.) et peuvent résister des mois voire des années avant de se développer. Dans des conditions optimales d'eau disponible, de température et de présence d'éléments nutritifs, elles germent et donnent naissance à des moisissures. Louise Schriver-Mazzuoli [23] indique dans son livre « La pollution de l'air intérieur » que l'atmosphère idéale pour qu'elles se développent est une humidité relative de 80 à 90 % sachant qu'une humidité relative de 65 à 75 % est déjà suffisante. Rappelons que si elle n'est pas évacuée, la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant se condense au contact des parois froides. Les vitrages peu performants, les encadrements de fenêtres et les murs mal isolés, en particulier quand ils sont exposés au Nord, se comportent comme un miroir dans la salle de bain sur lequel la vapeur d'eau de la douche se condenserait. Cette condensation, parfois juste sous forme de gouttelettes, va apporter l'eau nécessaire à la prolifération des moisissures. Selon certaines études récemment menées (citons par exemple celle de Chapin & al [4]), même s'il existe une relation statistique très forte entre le taux d'humidité ambiante et l'humidité murale, c'est en fait cette dernière qui s'avère être le véritable indicateur du développement des moisissures dans un logement. En effet, il faut que le support sur lequel vont se poser les spores soient à la bonne température et contiennent la quantité d'eau disponible suffisante. La ventilation locale et les microclimats aux surfaces des matériaux sont donc déterminants pour créer ce milieu propice.

Par ailleurs, pour que les spores germent et que les moisissures se développent, un élément nutritif doit être apporté. En milieu intérieur, il est souvent composé de cellulose. Ce support peut également être des fibres, du cuir, des aliments, un amas de matières organiques parfois

même des peintures au latex. En milieu clos, la proximité des matériaux contaminés augmente la possibilité d'être exposé à de fortes concentrations de composantes fongiques. L'institut national de santé publique du Québec ([8]) rappelle que « Il est intéressant de noter que les constructions récentes contiennent de nombreux matériaux cellulositiques. Le papier et la colle présents en surface du placoplâtre, les tuiles cartonnées des plafonds suspendus, les recouvrements de papier peint encollé ainsi que les matériaux de recouvrement constitués d'agglomérés de particules de bois constituent des substrats facilement dégradables par les moisissures en plus d'être des matériaux qui retiennent facilement l'eau. La porosité de ces matériaux facilite la pénétration des moisissures et permet le transfert des éléments nutritifs en surface ». Nous organiserions donc un habitat « confortable » pour les moisissures !

### 3.3.3 Moisissures : quels dangers pour la santé ?

Une fois installée, les moisissures se reproduisent et à leur tour, elles libèrent des spores qui peuvent parvenir jusqu'aux voies respiratoires en impliquant des conséquences sanitaires parfois très graves. La vitesse de l'air et le type de matériau (porosité, surface lisse, etc.) ont un impact sur le rythme de détachement des spores. Dans son article, Sivasubramani & al [24] indique que ce rythme est plus élevé pour les substrats poreux (les dalles de plafond).

Les spores ne sont pas les seules responsables d'effets pathogènes. Même si une relation entre l'exposition aux moisissures et des effets spécifiques sur la santé n'ont pas encore été établies par les études épidémiologiques, certaines études ont montré l'existence d'une association entre l'exposition aux moisissures et certains symptômes ([23]).

Le rapport publié par l'Institut de la santé publique du Québec [8] nous signale que, dans le cas des moisissures, le lien de causalité est difficile à relever notamment parce que :

- une moisissure est un agent pathogène par différents aspects (nous le verrons plus bas), de plus, il existe une grande variété de moisissures et de spores présentes dans un espace intérieur,
- il existe une variation temporelle des concentrations qu'il n'est pas toujours évident d'identifier (ce que confirme l'article de Charpin & al [4] sur l'humidité murale),
- il n'existe pas de seuils d'apparition des symptômes (et il n'existe d'ailleurs pas de seuil d'exposition),
- les conditions environnementales dans lesquelles se développent les moisissures sont aussi les conditions de développement des acariens (humidité), de concentrations de COV et de pollutions chimiques (air confiné).

Cependant, de plus en plus d'études amènent à des associations clairement établies et reconnues par la communauté scientifique entre la présence de moisissures et certains effets pathogènes. Et selon Louise Schriver-Mazzuoli, professeur des Universités en chimie-physique, [23], l'absence de relations entre les deux est surtout due aux faits « d'absence de standardisation des protocoles de prélèvement et d'identification, et de la difficulté à distinguer les effets avec ceux dus à d'autres contaminants potentiels ».

Nous pouvons identifier et classer les effets pathogènes des moisissures selon 4 catégories :



- Les allergies liées aux spores, fragments fongiques, composants des parois cellulaires et du cytoplasme. Selon le genre de moisissure, l'âge et l'état de santé de la personne exposée, les réactions peuvent aller de symptômes comme les rhinites, les bronchites, les conjonctivites, l'aggravation de l'asthme à des insuffisances respiratoires chroniques pouvant provoquer de la toux, de la fièvre, des céphalées, des douleurs thoracique et de l'anorexie.
- Les irritations qui proviennent de 2 facteurs :
  - les parois fongiques produisent des polymères de glucose (les  $\beta(1-3)$ glucanes), agents irritants pour les voies respiratoires,
  - les moisissures émettent des COV (responsables de l'odeur de moisi), capables de diffuser à travers les matériaux poreux du bâtiment et qui sont des agents irritants pour les yeux et les voies respiratoires.
- les effets toxiques des mycotoxines présentes dans les spores et dans mycélium de la moisissure peuvent s'avérer dangereux pour l'Homme. Ces substances se retrouvent dans l'air sous l'effet de courant d'air. Certaines peuvent s'attaquer au système immunitaire, entraîner des lésions de l'ADN de certaines cellules, être responsables de lésions vasculaires hémorragiques, avoir des effets d'aggravation de l'asthme.
- les infections qui peuvent amener au décès de la personne exposée et qui sont le facteur déclencheur de maladie nosocomiale à l'hôpital. Ces infections s'attaquent à des individus dont le système immunitaire est faible.

Le tableau suivant présente des moisissures dont les effets pathogènes ont été reconnus et leur localisation dans l'habitat. Aux vues de ces effets pathogènes graves et étant donnée la difficulté de se séparer de l'ensemble des matériaux sur lesquelles les moisissures se développent, la manière la plus efficace reste sans doute de ne pas laisser s'installer les conditions propices à leur germination et à leur prolifération en évacuant l'humidité vers l'extérieur.

| Espèce                             | Matériaux colonisés                                                                                             | Effets pathogènes                |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <i>Alternaria alternata</i>        | Papier peint<br>Bois et plantes<br>Poussières de maison                                                         | Allergisant                      |
| <i>Aspegillus flavus</i>           | Poussières de maison                                                                                            | Infectieux, allergisant, toxique |
| <i>Aspegillus fumigatus</i>        | Filtres et conduits                                                                                             | Infectieux, allergisant, toxique |
| <i>Aspegillus niger</i>            | Polyuréthane, tapisserie,<br>textile, cuir                                                                      | Infectieux                       |
| <i>Aspegillus versicolor</i>       | Colle, papiers peints, produits,<br>céramique                                                                   | Allergisant, toxique             |
| <i>Chaetomium</i>                  | Matériaux celluloseux<br>humides                                                                                | Allergisant                      |
| <i>Cladosporium sphaerospermum</i> | Textiles, cuir, caoutchouc<br>vulcanisé                                                                         | Allergisant                      |
| <i>Fusarium spp.</i>               | Bois et plantes, peinture et<br>adhésifs                                                                        | Infectieux, allergisant          |
| <i>Penicillium brevicompactum</i>  | Cuir, liège, bois, textile,<br>matières plastiques, papier<br>peint, peinture, adhésif,<br>poussières de maison | Allergisant                      |
| <i>Stachybotrys chartarum</i>      | Matériaux celluloseux<br>humides                                                                                | Allergisant toxique              |
| <i>Trichoderma viride</i>          | Textiles, papiers peints                                                                                        | Allergisant toxique              |

FIGURE 3.8: Support de développement et effets pathogènes de certaines moisissures présentes dans l'habitat (Source : pollution de l'air intérieur )

### 3.3.4 L'humidité, les acariens et les blattes

Les acariens qui vivent dans les logements sont appelés les acariens de la poussière de maison. Ces acariens, de la famille des pyroglyphidés, se nourrissent des débris de peau morte de l'homme et se développent dans les conditions optimales suivantes : température entre 15 et 20 °C et humidité relative entre 65 et 80 %. Leurs espaces de vie est la literie, les canapés en tissu, les tissus d'ameublement, les tapis et les moquettes. La valeur d'exposition considérée est la concentration des acariens dans les poussières. En moyenne, elle est de 50 à 200 acariens par gramme de poussières et peut atteindre des valeurs maximales de 3 000 acariens par gramme. Les acariens présentent des effets allergènes à travers leurs fèces et leur carapaces. La taille ces éléments (de 5 à 40  $\mu\text{m}$ ) leur permet de pénétrer dans les poumons. Sur une exposition prolongée, cela provoque des inflammations pulmonaires. On considère que 10 % de la population générale

et 45 à 85 % de la population asthmatique sont sensibilisés à cet agent. Ils sont une des causes de rhume chronique, d'asthme bronchique atopique, d'allergie oculaire et de conjonctivite. Le seuil de sensibilisation des allergènes dégagés par les acariens est fixé à 2  $\mu\text{g/g}$  de poussière. L'observatoire de la qualité de l'air a publié en 2006 les résultats d'une campagne sur la qualité de l'air dans les logements en France. Selon cette campagne, 50 % des logements ont des teneurs en allergènes d'acariens dans la poussière supérieures à 1,6 et 2,2  $\mu\text{g/g}$  pour deux des allergènes fréquents (les teneurs dépassent 86,3 et 36,5  $\mu\text{g/g}$  dans 5 % des logements) [23].

La présence d'acariens est donc liée à la poussière dans le logement. Il est recommandé d'ailleurs d'utiliser des aspirateurs avec des filtres HEPA en raison de la taille des microparticules allergènes. Notons surtout qu'un logement bien ventilé qui évacue l'humidité laisse moins de chance au développement de ces arachnides.

L'humidité est également un terrain de développement des blattes. Avec une hygrométrie de 70 % et une température comprise entre 25 et 32°C, les blattes prolifèrent pour peu qu'elles aient une source de nourriture (déchets organiques) à disposition. A l'instar des acariens, les agents allergènes dégagés par les blattes se situent sur les fèces et la carapace. Ils provoquent des rhinites et de l'asthme atopique. Par ailleurs, les blattes elles-mêmes sont des agents pathogènes.

### 3.3.5 L'humidité et les bactéries

Les bactéries sont présentes dans tous les milieux. La plupart, utilisées à bon escient, jouent un rôle important dans le traitement des eaux usées, dans l'agroalimentaire et l'industrie. Mais certaines d'entre elles sont pathogènes pour l'homme. Dans l'habitat, les bactéries se retrouvent « un peu partout ». Elles sont présentes chez les Hommes, sur les animaux domestiques, dans les poussières, et sur des matières organiques dans des lieux humides. Les bactéries présentes dans l'air intérieur peuvent provenir :

- des sécrétions des voies aériennes supérieures qui les aéroportent,
- des gouttelettes d'eau en suspension dans l'air générées par les appareils sanitaires,
- des systèmes de climatisation ou encore des humidificateurs ; l'eau stagnante offre un milieu propice à leur développement, elles sont ensuite transportées par les aérosols d'eau.

Les bactéries génèrent des toxines. Prenons le cas des endotoxines. Différentes études ont été menées pour étudier les typologies de logements dans lesquelles on retrouve un niveau élevé d'endotoxines. L'une d'entre elles est présentée dans un article publié en 2012 [5]. L'étude, menée sur un ensemble de villes européennes, a mesuré le niveau d'endotoxine présent dans la poussière de matelas de 974 ménages en Europe. Les influences sur le niveau d'endotoxines relevé de la zone géographique, du style de vie, de la présence d'animaux domestiques, de l'humidité relative, de la présence de moisissures, de l'âge du bâtiment, de la présence de moquette ou tapis dans la pièce... ont été évaluées. Les résultats sont présentés ainsi : il est fait un rapport entre le taux d'endotoxines relevées dans le cas de logements où le facteur d'influence étudié était présent et le taux d'endotoxines relevées dans le cas de logements où le facteur d'influence n'était pas présent. L'influence réelle de ce ratio obtenu est ensuite testée statistiquement de façon à la valider. Ainsi, si la « p-valeur » est inférieure à 10 %, on peut considérer que l'hypothèse faite de l'écart entre les résultats trouvés dans les deux cas est juste.

Les auteurs étudient certains facteurs en relation avec les questions d'humidité comme les tâches d'humidité sur le mur ou le plafond de la chambre, les moisissures visibles dans la chambre ou encore les fuites d'eau ayant eu lieu dans les 12 derniers mois. Une association est faite :

- entre les tâches d’humidité et le niveau plus élevé d’endotoxine ; en effet, nous constatons un ratio supérieur à 1 pour l’étude de ce facteur (1,70), ainsi qu’une p-value inférieure à 10 % (elle est égale à 0 %).
- entre les moisissures visibles dans la chambre et le niveau plus élevé d’endotoxine ; en effet, nous constatons un ratio supérieur à 1 pour l’étude de ce facteur (1,56), ainsi qu’une p-value inférieure à 10 % (elle est égale à 0,7 %).
- Lorsque le bâtiment a été construit avant 1970, le ratio est égal à 1,13 avec une p-value validant cette influence (9,5 %).
- On constate que le nombre de personnes a une influence sur le niveau d’endotoxine relevé. Selon l’étude, le nombre de personne vivant dans le logement a une influence sur le niveau plus élevé d’endotoxine (ratio égal à 1,44 et p-value équivalente à 0,1 %). Toutefois le détail de ce calcul n’est pas donné (nombre de personne, surface du logement).

Une autre étude aborde les facteurs influençant le niveau d’endotoxine relevé dans la poussière [2]. Réalisée sur 405 logements en Allemagne, elle évalue les niveaux d’endotoxine sur la poussière prélevée dans le salon. On peut pointer les résultats suivants :

- L’âge du bâtiment a une influence sur le niveau d’endotoxine. Les bâtiments construits après 1980 ont une moyenne (moyenne géométrique) d’endotoxine prélevées dans les poussières 40 % plus faible que les bâtiments construits avant 1980.
- Le nombre de personnes vivant dans le logement fait varier le taux d’endotoxine. Les logements accueillant entre 2 et 4 personnes ont un niveau d’endotoxine supérieur de 10 % par rapport à un logement accueillant 1 personne. Cette augmentation est égale à 57 % pour un logement accueillant plus de 5 personnes. La taille du logement et le nombre de pièces va également dans ce sens.
- Si le nombre d’heures hebdomadaire pendant lesquelles les fenêtres sont ouvertes n’a pas d’impact significatif, l’attention apportée par les ménages aux questions de ventilation et leur attitude ont un rôle : chez un ménage ne portant pas d’attention à la ventilation (ouverture des fenêtres inférieure à une demi-heure par jour), le niveau d’endotoxine est supérieur de 38 % au niveau obtenu chez un ménage ayant une attitude qualifiée de normale vis-à-vis de la ventilation.
- L’humidité relative intérieure ou extérieure au logement n’a pas d’impact significatif sur le niveau d’endotoxine. En revanche, lorsque des signes physique d’humidité comme des tâches d’humidité sur les murs sont identifiés ou ont eu lieu dans les 12 mois précédent l’échantillonnage, le niveau d’endotoxines relevé est supérieur de 30 % par rapport à des logements n’ayant pas rencontré ce problème.

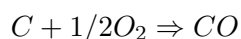
D’autres études réalisées sur les endotoxines présentent les mêmes points clés, à savoir que la présence d’humidité sur les surfaces, voire la présence de moisissure est un facteur de prolifération bactérienne dans les logements. Cependant, le taux d’humidité relative n’est pas mis en lien directement avec le niveau d’endotoxine. En réalité, l’humidité relative ne présente un risque de prolifération des bactéries que si elle est constante, qu’elle n’est pas évacuée correctement et si une condensation sur des surfaces froides a lieu de manière durable. Le fait que les bactéries soient notamment véhiculées par les Hommes, que les Hommes sont par ailleurs émetteurs de vapeur d’eau est un élément important à noter dans la construction de logements sociaux. En

effet, le nombre de personnes présentes dans le logement a un lien avec le niveau d'endotoxine, ainsi qu'un lien avec les problèmes d'humidité (voir paragraphe précédent - enquête INSEE Logement [6] et [3]) et les enquêtes INSEE [12] révèlent que les ménages à revenus modérés ou à bas revenus (définition INSEE) vivent dans des logements plus peuplés que les autres ménages :

- plus de la moitié des ménages à bas revenus vivent dans des logements à peuplement normal, surpeuplement modéré ou accentué (32 % dans des logements à peuplement normal, 15 % dans des logements à surpeuplement modérés, 5 % dans des logements à surpeuplement accentué),
- 39 % des ménages à revenus modérés vivent dans les mêmes conditions,
- seulement 22 % des autres ménages vivent dans ces conditions.

### 3.4 Le monoxyde de carbone

Pour qu'une combustion soit complète, il faut une arrivée d'air suffisante (par exemple 10 m<sup>3</sup> d'air sont nécessaires à la combustion d'1 m<sup>3</sup> de gaz naturel). Cette réaction complète forme du dioxyde de carbone. Dans l'atmosphère, le dioxyde de carbone n'est pas toxique, mais il entraîne somnolence et maux de tête au-delà d'une certaine teneur dans l'air ambiant. En revanche, lorsque la combustion de produits carbonés est incomplète, le carbone et l'air (insuffisant) forme un gaz imbrûlé : le monoxyde de carbone, gaz potentiellement dangereux pour l'être humain.



Les appareils de combustion domestiques sont donc sources de monoxyde de carbone mais également d'oxyde d'azote et de COV. Il est indispensable d'évacuer les gaz issus de cette réaction, par un conduit d'évacuation efficace ou par un débit de ventilation suffisant dans le cas d'appareils de combustion non raccordés à un conduit. Un conduit d'évacuation défaillant peut amener à des situations d'intoxication mortelle au CO. Le conduit doit être ramoné et ne doit pas présenter de bouchon ou même de fissures. Les inversions de tirage liées à la présence d'une hotte dans la pièce de l'appareil de combustion, à un refroidissement des fumées dans le conduit ou encore à une surpression des vents en toiture peuvent également être responsables de la présence de monoxyde de carbone dans les pièces.

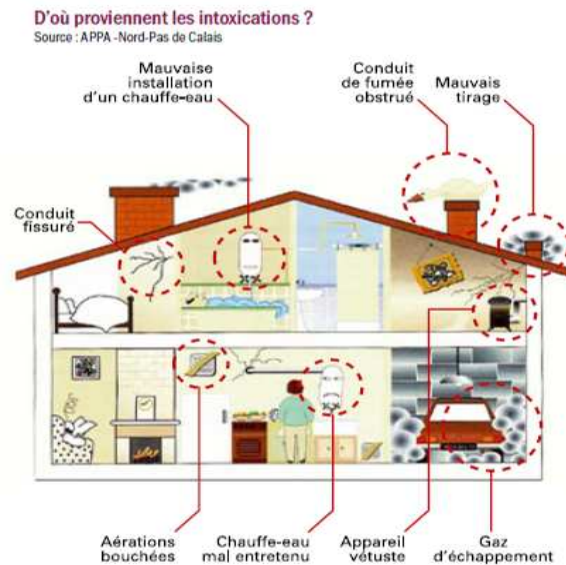


FIGURE 3.9: Les sources d'émission de monoxyde de carbone dans un logement (Source : APPA Nord Pas de Calais)

L'impact sur la santé du monoxyde de carbone est très grave. Ce composé a une densité proche de celle de l'air et il se mélange facilement dans l'air ambiant. Inodore, incolore, et non irritant pour les muqueuses, il n'est pas détectable par les occupants s'il n'y a pas d'appareil spécifique de détection. Inhalé en quantité importante, il provoque une intoxication grave voire mortelle : il se fixe sur l'hémoglobine grâce à son affinité beaucoup plus forte avec cette dernière que l'oxygène. La formation de la carboxyhémoglobine dans le sang provoque une hypoxie (inadéquation entre les besoins tissulaires en oxygène et les apports) dans des organes vitaux (le système nerveux central et le myocarde). En France, sa présence est la cause de 5 000 intoxications par an dont une centaine de décès. Une étude menée par l'institut de veille sanitaire (INVS) en 2007 a permis d'identifier les typologies de logements, les équipements en cause et les facteurs d'intoxication des cas déclarés. Selon l'INVS, cette étude est confortée par les résultats de celle menée en 2006. L'étude est basée sur les cas d'intoxication déclarée. Il a été compté en moyenne pour chaque cas déclaré deux personnes intoxiquées. Pour plus de la moitié des cas déclarés, la cause de l'intoxication a pu être identifiée. Le tableau suivant présente de manière croisée les équipements en cause et la catégorie socio-professionnelle du chef de famille dans laquelle a eu lieu l'intoxication. [25]

La chaudière présente la majorité des cas déclarés d'intoxication au CO dont la source a pu être identifiée (42,4 %), puis, sont mis en cause le chauffe-eau / bain (10,7 %), le poêle / radiateur (8,1 %), le foyer fermé / insert (6,2 %), la cuisinière (5,9 %), le chauffage mobile d'appoint (4,9 %). Même si les CSP ne sont pas les seuls indicateurs de situation économique du foyer, le classement par CSP apporte une lecture intéressante : sur l'ensemble des intoxications, 16,5 % des cas sont des employés, 14,2 % sont des ouvriers alors que seulement 9,3 % sont des cadres et professions intellectuelles supérieures et 6,3 % sont des professions intermédiaires. Lorsque la chaudière est la

| CSP du chef de famille                        | Chaudière<br>(n=305) | Poêle/<br>radiateur<br>(n=59) | Chauffage<br>mobile<br>d'appoint<br>(n=37) | Cuisinière<br>(n=47) | Chauffe-eau<br>(n=65) | Foyer fermé/<br>insert (n=44) | Autre<br>(n=125) | Total<br>(n=682) |
|-----------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|------------------|
|                                               | %                    | %                             | %                                          | %                    | %                     | %                             | %                | %                |
| Agriculteur exploitant                        | 2,3                  | 6,8                           | 0,0                                        | 2,1                  | 4,6                   | 4,5                           | 1,9              | 3,1              |
| Artisan, commerçant et chef d'entreprise      | 8,8                  | 10,2                          | 2,7                                        | 2,1                  | 7,7                   | 2,3                           | 12,6             | 8,1              |
| Cadre et profession intellectuelle supérieure | 15,4                 | 0,0                           | 5,4                                        | 0,0                  | 12,3                  | 0,0                           | 7,8              | 9,3              |
| Profession intermédiaire                      | 9,2                  | 5,1                           | 10,8                                       | 2,1                  | 6,1                   | 0,0                           | 5,8              | 6,5              |
| Employé                                       | 18,7                 | 11,9                          | 24,3                                       | 2,1                  | 18,5                  | 20,4                          | 14,6             | 16,5             |
| Ouvrier                                       | 13,8                 | 15,2                          | 21,6                                       | 2,1                  | 10,8                  | 6,8                           | 19,4             | 14,2             |
| Retraité                                      | 22,0                 | 42,4                          | 13,5                                       | 78,7                 | 29,2                  | 52,3                          | 26,2             | 31,3             |
| Étudiant/apprenti/stagiaire                   | 7,5                  | 8,5                           | 18,9                                       | 10,6                 | 3,1                   | 13,6                          | 11,6             | 9,0              |
| Autre personne sans activité professionnelle  | 2,3                  | 0,0                           | 2,7                                        | 0,0                  | 7,7                   | 0,0                           | 0,0              | 1,9              |

FIGURE 3.10: Equipement en cause et CSP du chef de famille dans les cas d'intoxications déclarées en 2007

source de l'intoxication (cas majoritaire), les cas pour les cadres et les professions intellectuelles supérieures sont équivalents aux cas pour les employés et les ouvriers. Cependant, dès lors que l'intoxication provient d'un chauffage d'appoint, un poêle / radiateur ou un foyer fermé, ces deux dernières catégories sont victimes de plus d'accidents. Nous pouvons lier ces disparités à la plus forte présence de ces appareils dans des familles à plus bas revenu.

L'étude identifie ensuite quels sont les facteurs de l'intoxication quand il a pu être décelé. Pour près de 54 % de ces cas, le défaut d'aération (arrivée d'air et extraction) est déterminant dans l'intoxication. Ce résultat est croisé avec les équipements en cause. Notons que ce défaut d'aération intervient pour 71 % des intoxications liées à un poêle / radiateur, 86 % des intoxications liées à un foyer fermé / insert et pour 56,9 % des intoxications liées à un chauffage mobile d'appoint. De manière générale, le défaut d'aération des logements semble être le plus problématique dans le cas d'intoxication liée à un équipement de chauffage. Le défaut d'aération est décrit comme une entrée ou une sortie d'air obstruée, obturée ou absente. On retrouve des cas de bouches d'aération obturées ou obstruées pour amoindrir une sensation de courant d'air froid et / ou pour diminuer la facture énergétique (en diminuant les déperditions liées au renouvellement de l'air). Une crainte peut être formulée : l'obturation ou l'obstruction des systèmes de ventilation et le recours au chauffage d'appoint est le moyen pour des personnes en situation de précarité énergétique de faire face à un prix des combustibles fossiles soumis à une inflation grandissante.

|                                   | Défaut                     |                            |                               | Participation météo<br>% | Au moins un facteur<br>% |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                   | Aération <sup>1</sup><br>% | Appareil <sup>2</sup><br>% | Utilisation <sup>3</sup><br>% |                          |                          |
| Toutes sources confondues (n=893) | 53,6                       | 19,0                       | 17,4                          | 22,6                     | 74,2                     |
| Chaudière (n=410)                 | 46,1                       | 27,6                       | 7,8                           | 21,2                     | 70,5                     |
| Chauffe-eau (n=103)               | 63,7                       | 25,2                       | 13,6                          | 19,4                     | 80,6                     |
| Poêle/radiateur (n=136)           | 71,0                       | 10,3                       | 11,8                          | 49,3                     | 86,8                     |
| Foyer fermé/insert (n=50)         | 86,0                       | 6,0                        | 4,0                           | 32,0                     | 86,0                     |
| Chauffage mobile d'appoint (n=51) | 56,9                       | 21,6                       | 41,2                          | 2,0                      | 74,5                     |
| Brasero/barbecue (n=47)           | 36,2                       | 2,1                        | 74,5                          | 0,0                      | 85,1                     |
| Groupe électrogène (n=33)         | 27,3                       | 3,0                        | 54,5                          | 18,2                     | 66,7                     |
| Cuisinière (n=63)                 | 70,5                       | 15,9                       | 12,7                          | 25,4                     | 74,6                     |

<sup>1</sup> Par exemple, une entrée ou une sortie d'air obstruée, obturée ou absente  
<sup>2</sup> Dysfonctionnement de l'appareil  
<sup>3</sup> Utilisation anormalement prolongée ou utilisation en intérieur d'appareils réservés à un usage en extérieur

FIGURE 3.11: Les facteurs d'intoxication au monoxyde de carbone

### 3.5 Les COV, composés organiques volatils

Les matériaux qui nous entourent, voire nous protègent du froid, peuvent générer des pollutions. Les matériaux organiques sont issus de la matière formée par les êtres vivants végétaux, animaux ou micro-organisme ou de la matière issue de leur décomposition. Ce sont des matériaux carbonés. On retrouve des matériaux organiques naturels (le bois, le coton...) ou synthétique (plastique). Les matériaux organiques émettent tous des composés organiques volatils. Ces composés sont généralement relargués dans l'air ambiant sur une durée qui peut atteindre plusieurs mois. Il s'agit de l'émission primaire, liée à la seule présence de la matière organique. Cette émission peut être évacuée par la ventilation. En général, cette émission est très forte après la fabrication et puis diminue au fur et à mesure, mais certains matériaux peuvent émettre pendant 1 an. Ensuite, les matériaux organiques peuvent avoir des capacités d'adsorption, fixant ainsi des pollutions émises par d'autres sources. On parle d'émission secondaire lorsqu'il y a réaction chimique entre l'adsorbant et la pollution adsorbée. En plus de ralentir le processus d'évacuation des COV par la ventilation, cette émission secondaire peut recontaminer l'air intérieur.

Certains matériaux organiques naturels émettent très peu de COV (comme le liège, la laine, le bois de feuillus). Mais, les traitements réalisés sur certains matériaux organiques ou minéraux initialement très faiblement émetteurs de COV peuvent transformer le produit en source de pollution. Citons par exemple les adhésifs pour fixer les parquets, les moquettes ou le linoléum, les plastifiants des revêtements, les liants des produits d'isolation, les résines conventionnelles des panneaux de particules, les produits utilisés pour traiter la porosité de certains fibres, les colles, les produits ignifuges et antitâches, les produits de traitement du bois. Le tableau suivant présente les composés organiques que l'on retrouve dans certains matériaux organiques.



| Matériaux               | Familles de composés organiques                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bois aggloméré          | Aldéhyde (formaldéhyde)                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Isolants                | Aldéhyde (formaldéhyde), HC aromatiques (styrène), Cétones (acétone)                                                                                                                                                                                                                           |
| Colles                  | Alcanes (nonane), HC aromatiques (toluène, styrène, triméthylbenzène), HC halogénés (trichloréthylène), Esters (acétate d'éthyle et de vinyle), Alcools (propanol, isopropanol, butanol), Cétone (acétone), Aldéhyde (formaldéhyde, acétaldéhyde), Éther de glycol (éthylglycol, méthylglycol) |
| Moquettes               | HC aromatiques (styrène), Aldéhyde (formaldéhyde), Amines (4-phénylcyclohexène, vinylcyclohexène, 2-éthyl 1-héxanol), siloxanes                                                                                                                                                                |
| Papiers peints          | Aldéhyde (formaldéhyde)                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Peintures phase solvant | HC aromatiques (toluène), HC aliphatiques (xylène, benzène), Alcools (éthanol, butanol), Cétones (acétone), Esters (acétate d'éthyle)                                                                                                                                                          |
| Peintures phase aqueuse | Alcools (propanol, isopropanol), Éther de glycol, Aldéhydes, Fongicides (formaldéhyde)                                                                                                                                                                                                         |
| Textiles                | Cétones (acétone), Aldéhydes (formaldéhyde), Esters (acétate d'éthyle)                                                                                                                                                                                                                         |

FIGURE 3.12: COV émis par des matériaux courants dans un logement

Un des COV les plus surveillés est le formaldéhyde. Ce polluant est souvent présent dans les logements. Il s'agit d'un conservateur couramment utilisé dans les produits de construction, les produits de bricolage, les produits d'entretien, les produits cosmétiques, etc. Il se retrouve également dans la fumée de tabac et les combustions incomplètes des appareils tels que les cheminées ou les poêles. Selon le rapport de l'Afsset, ce composé est toxique et irritant pour les voies aériennes supérieures lors d'exposition chroniques et est classé en catégorie C1 (lien établi avec le cancers du nasopharynx). A de plus faibles expositions, ce composé a des conséquences sur le développement de maladies respiratoires (asthme, allergies). Une étude australienne a permis de mettre en avant que sur l'échantillon d'enfants observés, ceux exposés à des teneurs en formaldéhyde supérieures à  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ont 39% de risque supplémentaire de développer un asthme par rapport aux autres. Par ailleurs, ces concentrations élevées étaient « corrélées de manière significative à la présence d'un chauffage à gaz et à la pose d'une moquette récente » [25].

Le benzène est également présent dans les produits d'entretien, les produits de construction et de décoration et lors de combustions incomplètes. Lorsqu'il est inhalé, il est très vite assimilé par le corps et vient s'accumuler dans les tissus riches en lipides. Il se fixe particulièrement dans le foie et dans la moelle osseuse. Il entraîne alors une dépression du système respiratoire et du système nerveux central, le décès étant une des conséquences. Une mise en lien a été établie entre l'exposition au benzène et l'apparition de leucémies. Chez les femmes, lors d'une exposition chronique, le benzène entraîne une baisse de la fertilité.

Les COV sont émis par les matériaux, cette émission dépend du taux initial du matériau et des conditions de température de la pièce. Il est recommandé de bien aérer le logement au moment de l'utilisation de matériaux émetteurs. Cependant, certains matériaux peuvent émettre pendant plus d'une année. Par ailleurs, la ventilation peut également avoir un impact négatif sur la diffusion du polluant dans le logement : si la convection est élevée mais que l'extraction n'est pas efficace, le COV est très fortement émis dans l'espace et y reste au risque d'être adsorbé par un matériau à proximité.

Certaines industries travaillent aujourd'hui à la création de matériaux actifs capables de capter les COV et de les transformer en matériaux inactifs. Il existe ainsi :

- Les matériaux photo-actifs, ce sont des matériaux de revêtement intégrant des nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  (dioxyde de titane). A une température ambiante, ces matériaux produisent des ions et des radicaux libres. Suite à une succession de réactions chimiques, ces derniers permettent de minéraliser les COV à la surface du matériau. Cependant, bien souvent, l'intensité lumineuse du logement ne permet pas la réaction chimique. Par ailleurs, le catalyseur se désactive dans le temps. Enfin, la minéralisation à la surface du matériau ne s'élimine pas. L'effet apparait donc limité. Il est même négatif selon certaines études, en effet, certaines réactions sont incomplètes et dégagent des polluants parfois plus nocifs que le COV éliminé. Enfin, le  $\text{TiO}_2$  sous forme de nanoparticules a été testé chez l'animal et des effets cancérogènes, reprotoxiques et génotoxiques ont été identifiés.
- Les matériaux adsorbants physiques (zéolite, charbon actif, kératine). Ces matériaux fonctionnent par phase d'adsorption et de désorption. Ils apportent donc une inertie à la pollution et consistent à étaler la pollution dans le temps. Ces produits peuvent être intéressants dans le cas de locaux à occupation discontinue.
- Les matériaux adsorbants chimiques. Ils réagissent chimiquement avec certains polluants. Cependant, à l'instar des nanoparticules, leur efficacité dans le temps n'est pas prouvée et il est suspecté des émissions de produits toxiques dégagées par les réactions.

Nous verrons plus loin que l'essentiel du travail au niveau international et au niveau européen consiste avant tout aujourd'hui à limiter fortement les émissions de COV à la source.

### 3.6 Les particules

Certaines pollutions sont physiques et se traduisent par des particules solides ou solides-liquides en suspension dans l'air. Elles peuvent provenir de l'extérieur (érosion éolienne, embruns marins, feux de forêt, industrie, transport, chauffage résidentiel...) ou être produite au sein du logement (cuisson, tabagisme, bricolage, nettoyage, animaux, appareils de combustion, laine minérale soumise à un courant d'air, pollution secondaire...). Elles se caractérisent par leur composition chimique, leur taille, leur origine. Une classification courante de ces substances est de les différencier selon leurs caractéristiques aérodynamiques, on indique alors leur diamètre aérodynamique.

Aéroportées, les particules se déposent sur les voies respiratoires. En plus de la composition chimique, leur effets sur la santé dépendent de leur taille et donc de leur pénétration plus ou moins profondes dans les organes humains et de leur durée de vie dans l'organisme. Les particules sur lesquelles l'attention est portée principalement sont les particules grossières, les PM10 (diamètre compris entre 2,5 et 10  $\mu\text{m}$ ), les particules fines, les PM 2,5 (diamètre compris entre 1 et 2,5  $\mu\text{m}$ ),

les particules submicroniques, les PM 1 (diamètre inférieur à  $1\ \mu\text{m}$ ) et les particules ultrafines (diamètre inférieur à  $0,1\ \mu\text{m}$ ). Les particules fines et ultrafines proviennent principalement de la combustion. La figure et le tableau suivants nous indiquent à quel niveau les particules peuvent pénétrer dans l'organisme en fonction de leur taille.

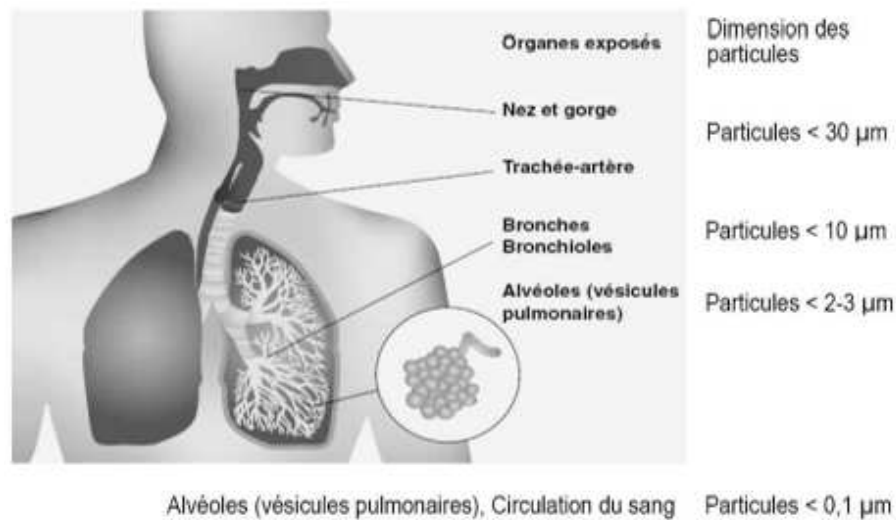


FIGURE 3.13: pénétration des particules dans les voies respiratoires et l'organisme en fonction de leur diamètre aérodynamique

| Taille de la particule              | Pénétration dans l'organisme                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Les particules $> 10\ \mu\text{m}$  | Elles sont arrêtées par les poils du nez et les muqueuses nasales. La partie qui parvient jusqu'aux poumons est évacuée rapidement par les cils vibratiles tapissant les voies respiratoires.  |
| Les particules $< 10\ \mu\text{m}$  | Elles pénètrent et restent en majorité dans la zone extrathoracique. Une petite partie (5 à 1 %) peut parvenir jusqu'à la trachée et les bronches et moins de 5 % parvient jusqu'aux alvéoles. |
| Les particules $< 0,1\ \mu\text{m}$ | Elles pénètrent les globules rouges et les cellules et peuvent en atteindre le noyau (propagation dans tous l'organisme).                                                                      |

FIGURE 3.14: pénétration des particules dans l'organisme

Lorsqu'elles atteignent les alvéoles, les conséquences peuvent être très graves : système immunodépressif, inflammation et détérioration des poumons, vasoconstriction artérielle, asthme, toux, troubles cardio-vasculaire, cancers. De nombreuses études ont permis de mettre en avant les effets à court terme d'une exposition aux particules atmosphériques. Sur le long terme, les effets sont moins bien documentés mais présentent néanmoins des résultats alarmants d'augmentation significative de mortalité et de survenue de maladie respiratoires et cardio-vasculaires.

Les particules sont nombreuses dans l'atmosphère, l'air extérieur en est chargé et vient polluer les logements lors du renouvellement de l'air. Dans le cadre des nombreux travaux de recherches menés par la France sur la qualité de l'air extérieur, les effets de la pollution urbaine liée aux particules sont connus. Mais ces enquêtes sont beaucoup moins nombreuses pour les pollutions intérieures. La toxicité des particules est dépendante de la nature du mélange, dépendant lui-même des sources d'émission. Ainsi, il est difficile de transposer les résultats toxicologiques obtenus dans les études traitant de l'air extérieur sur l'air intérieur. Selon l'AFSSET, en 2005, la présence dans l'atmosphère des PM 10 était due pour 30 % à l'agriculture et la sylviculture, pour 28 % à l'industrie manufacturière, pour 27 % au secteur résidentiel et tertiaire (particulièrement la combustion du bois, du charbon et du fioul), pour 11 % au transport routier, pour 2 % à la transformation d'énergie et pour 2 % aux transports autres que routier. Les PM 2,5 en suspension dans l'air extérieur étaient liées également au résidentiel et tertiaire (combustion) pour 41 %, à l'industrie manufacturière pour 26 % et à l'agriculture et la sylviculture pour 17 %. Globalement, les émissions anthropiques sont en diminution depuis 1999.

Lors des campagnes de mesures récemment menées en France, dans certains cas, les sources de pollutions extérieure (trafic routier, émissions en provenance d'usines à proximité...) peuvent se retrouver majoritaire dans l'analyse de pollution de l'air intérieur. Une étude néerlandaise menée en 2002 par Hoek & al [14] a conclu la chose suivante : il existe un facteur de risque de mortalité de 1,95 pour des personnes vivant dans une zone de 50 m d'une route de passage fréquent ou dans une zone de 100 m d'une autoroute. Ce risque accru de mortalité est lié à l'exposition des particules fines émises par des véhicules et retrouvées dans l'air intérieur. Cette relation entre la proximité de routes de passage et l'exposition aux polluants émis par le trafic routier retrouvés dans l'air intérieur a été mis en avant également dans d'autres études. Citons notamment Heinriche [13], Janssen [15], Martuzevicius [20], Meija [21]. En France, le CSTB a réalisé un prélèvement sur un appartement parisien inoccupé et situé en bordure du périphérique en 2001. « 80 % des niveaux de PM 2,5 dans l'air ambiant étaient retrouvés dans l'air intérieur ». Par ailleurs, l'OQAI, après analyse des différentes enquêtes menées sur le sujet estime que « la pollution particulaire intérieure en PM 10 et PM 2,5 serait largement d'origine extérieure, en moyenne et indépendamment d'événements spécifiques dans le local particulièrement émetteurs. » (rapport de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur sur les particules 2009).

La taille des particules influent sur leur capacité à passer de l'air ambiant à l'air intérieur. Ce sont les particules fines qui pénètrent le plus dans les logements. Un article publié par Slezakova et al. [27] indique que les PM10 en provenance de l'extérieur constituent 10 à 40 % des particules retrouvées à l'intérieur, et que ce pourcentage s'élève à une fourchette allant de 35 à 92 % pour les particules inférieures à 2  $\mu m$ . Une étude menée par Sippola et Nazaroff [28] a identifié les conditions de transfert en fonction de la taille des particules. Ainsi, les particules submicroniques transitent dans les gaines de ventilation sans se déposer ou être adsorbées par ces dernières. En revanche, en présence de filtres classiques, leur pénétration est réduite de 34 %. Les particules plus grosses pénètrent moins facilement dans le logement, en raison de leur dépôt ou de leur adsorption sur les parois des gaines de ventilation ou des parois du bâtiment. Mais

en l'absence de filtre, leur transfert reste élevé. Les particules sont également émises à l'intérieur du logement. Parmi les sources intérieures, le tabac est le facteur le plus émetteur de particules dans le logement. La teneur des particules dans l'air intérieur reste difficile à évaluer. Celle-ci dépend notamment de la ventilation dans le logement et des déplacements de poussières.

Les particules sont non seulement potentiellement dangereuses relativement à leur composition chimique et leur diamètre, mais en plus, elles transportent d'autres polluants comme les spores, les toxines générées par les bactéries, les agents pathogènes, les métaux lourds, les pesticides. Aux vues du risque encouru lors d'exposition régulière et à teneur élevée, des valeurs guides ont été instituées. Les valeurs guides sont  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{2,5}$  et de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$  or lors d'une campagne menée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, dans 50 % des logements, les teneurs en particules  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$  étaient supérieures à 19,1 et  $31,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ces valeurs atteignaient des niveaux très dangereux pour 5 % des logements ( $133$  et  $182 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

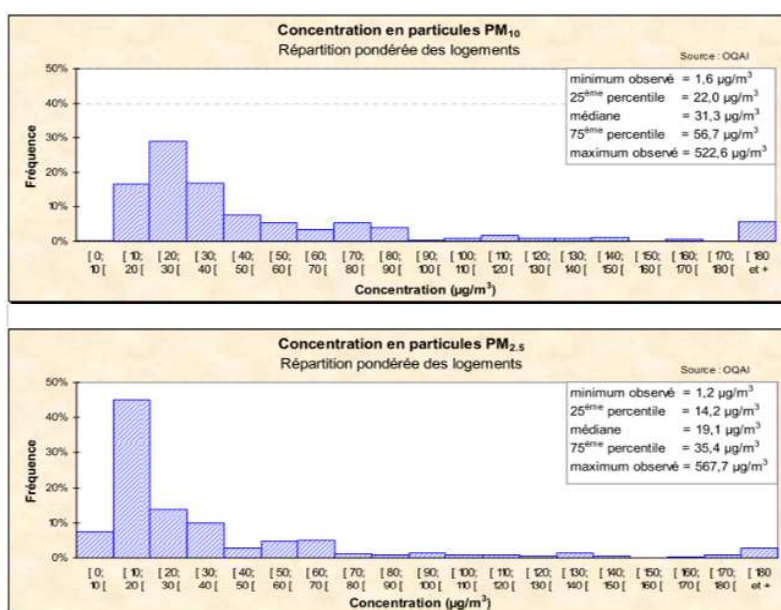


FIGURE 3.15: Répartition des logements selon la teneur en particules relevée lors de la campagne menée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur

Notons enfin que selon l'enquête menée par Janunten [17], la majorité des maladies respiratoires sont liées aux particules fines. Nous étudierons dans la troisième partie la question de la ventilation et du mode de régulation. Nous y verrons qu'en France, le système qui tend à se diffuser aujourd'hui est la ventilation hygrorégable. Dans le cas où l'humidité devient le seul traceur de pollution, comment s'assurer que le logement n'est pas surchargé en particules ?

### 3.7 Les pesticides

Un pesticide est une substance chimique, un agent biologique ou un désinfectant qui sert à limiter, détruire ou repousser des organismes indésirables pour l'agriculture ou l'hygiène publique. Les pesticides vendus dans le commerce ont différentes actions en fonction de leur destination. On retrouve parmi les pesticides :

- les acaricides pour les acariens et les mites et les insecticides pour les insectes qui interfèrent sur le système nerveux,
- les avicides pour les oiseaux,
- les herbicides pour les végétaux qui inhibent la photosynthèse,
- les fongicides pour les champignons qui inhibent la synthèse des acides aminés,
- les piscicides pour les poissons,
- les rotenticides pour les rongeurs,
- les bactéricides pour les bactéries.

Trois contextes peuvent dégrader les pesticides :

- la présence de microorganismes (les champignons et les bactéries),
- les réactions chimiques dans le sol, l'eau et l'air,
- la photodégradation (le rayonnement solaire).

La dégradation peut s'effectuer en plusieurs heures mais aussi en plusieurs années, selon les caractéristiques physico-chimiques du pesticide et de l'intensité lumineuse. La dégradation chimique et la photodégradation peuvent transformer le pesticide en aérosol ou en polluant secondaire. Transportés sur de longues distances, ces pollutions primaires ou secondaires se retrouvent dans l'habitat où ils sont transportés par les poussières en suspension. Protégés de la lumière et de la pluie, leur dégradation est lente. En 2008, l'Institut National de l'Environnement Industriel et du Risque et la faculté des sciences pharmaceutiques et biologiques de l'Université de Paris V [16] ont réalisé une étude sur la présence des pesticides dans les maisons. Des questionnaires ont été établis, des prélèvements d'air, de poussières déposées sur les sols du logement, des résidus cutanés manipulés et des recueils d'urine ont été effectués et les enquêteurs ont étudié l'exposition aux pesticides d'enfants résidant en maison individuelle ou en appartement à Paris et en région parisienne. 87 % des familles ont déclaré avoir utilisé au moins un pesticide (insecticide dans 93 % des cas) dans l'année précédente l'enquête alors que dans 94 % des logements un pesticide a été retrouvé, sachant que les parents ne sont pas professionnellement exposés à ces composés. Parfois même, ce pesticide était interdit. Par ailleurs, une corrélation entre les produits utilisés par les parents et les substances trouvées lors de l'enquête n'a pas toujours été faite.

### 3.8 le tabac : particules et COV

Le tabac regroupe plusieurs pollutions. Il est la source de nombreuses inquiétudes pour les autorités sanitaires. Celles-ci mettent en place depuis des années des actions contre le tabagisme. Il s'agit de l'une des plus fortes pollutions intérieures. Relarguée dans l'atmosphère intérieure, la fumée de tabac est un mélange de gaz et COV (monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, oxyde nitrique, formaldéhyde, benzène) et de particules de différentes tailles (cyanure d'hydrogène, phénols, cresols, métaux tels l'arsenic, le cadmium, le nickel, le plomb). Les scientifiques ont pu relever dans la fumée de tabac 5 000 espèces chimiques différentes. Parmi celles-ci, une grande partie sont des espèces cancérogènes comme les N-nitrosamines, les hydrocarbures aromatiques

polycycliques, le métal et plus de 100 peuvent être considérées comme des poisons chimiques. Chaque année, plus de 3 millions de personnes meurent à cause de leur tabagisme.

Il est prouvé que l'exposition à la fumée de tabac (en dehors de la fumée inhalée par le fumeur) augmente les risques et les fréquences des maladies respiratoires et de l'asthme, des cancers du poumon. Selon Berstein & al [1], le tabagisme passif à la maison augmente le risque de développer de l'asthme par 40 à 200 %. Les enfants sont particulièrement touchés par cette maladie, qui reste ensuite présente à l'âge adulte. Dans les pays occidentaux, on estime que 50 % des logements sont occupés par au moins un fumeur (WHO, 2000a). S'il existe aujourd'hui des mesures fortes pour lutter contre le tabagisme dans les lieux publics, aucune loi ne peut intervenir dans les logements.

Le tabagisme génère encore une autre pollution, appelé en anglais « the third-hand smoke ». Les polluants déposés sur les murs, les tapis, les meubles, voire la nourriture, peuvent être inhalés lors d'un déplacement de poussières, ingérés via la nourriture (ou pour les enfants, via les objets portés à la bouche, sachant qu'il ingère plus de deux fois plus de poussières que les adultes dans une journée) et être le vecteur de polluants secondaire en réagissant avec d'autres polluants (la nicotine réagit avec l'ozone par exemple). Là encore, les enfants sont plus sensibles à ces nouvelles espèces aéroportées.

### **3.9 Les acteurs de la qualité de l'air et leurs champs d'action**

La qualité de l'air des locaux accueillant des travailleurs ou recevant du public est de plus en plus surveillée, un réseau d'acteurs met en place animation, sensibilisation et réglementation (le Comité d'Hygiène de Sécurité et des Conditions de Travail, le CGSCT, l'inspection du travail, les caisses régionales d'assurance maladie, l'Institut National de Recherche et de sécurité, l'INRS). Il est en revanche plus délicat d'intervenir dans la sphère privée de l'habitat, tout comme il est impossible d'interdire de fumer dans un logement. Cependant, étant donné l'enjeu sanitaire, les acteurs de la santé en France, en Europe et au niveau international se donnent au fur et à mesure les moyens de limiter l'impact sur la santé des pollutions de l'air intérieur.

#### **3.9.1 Niveau international : l'OMS**

C'est en 1993 que l'OMS met en avant le syndrome des bâtiments malsains (Sick-Building Syndrom), syndrome qui rassemble des symptômes liés à la mauvaise qualité de l'air intérieur (fatigues, irritation des voies respiratoires, maux de tête, etc.). En 1999, la zone Europe de l'OMS travaille sur une politique-cadre Santé 21 dont l'un des objectifs est que la population dispose d'espaces intérieurs sains. Cela passe notamment par la réduction des émissions à la source (création de valeur guide pour la toxicité de matériaux de construction et de décoration).

Dans le cadre d'une Politique Santé, l'OMS lance en parallèle un programme de lutte contre les expositions des enfants aux fumées de tabac, de combustion, de cuisson et de limitation de l'exposition aux produits cancérigènes dans les espaces clos comme les écoles. La qualité de l'air intérieur est prise très au sérieux, il s'agit en effet d'un impact sanitaire important. En tant qu'organisation internationale apolitique, l'OMS peut jouer son rôle d'alerte et fixer de vrais objectifs.

#### **3.9.2 Niveau européen : les produits de construction**

Il est plus difficile de mettre en place des politiques de santé au niveau européen, étant donné les enjeux et les jeux d'acteurs de la sphère économique et de la sphère de la santé.

L'Europe est une institution politique. Ses intérêts sont variés et la gestion des conflits d'acteurs rend les actions plus lourdes à mettre en place. Par ailleurs, en raison du marché commun et du libre échange, une réglementation nationale ne peut interdire complètement un produit de construction allant à l'encontre d'un critère sanitaire établi dans ce pays. Le pays lui-même doit donc attendre les réglementations au niveau européen ou peut utiliser les labels pour inciter à limiter le recours à certains produits. Des pays comme l'Allemagne ont pris les devants sur ce point et le label Blue Angel est aujourd'hui clairement reconnu et constitue un gage de qualité. Mais il ne représente pas une contrainte.

Après avoir travaillé sur la classification des substances dangereuses (cancérogènes, toxiques et mutagènes), l'Europe parvient aujourd'hui à se doter d'une réglementation (le Règlement des Produits de Construction, abordé plus loin) qui a pour objectif l'harmonisation des différentes pratiques nationales et qui se base sur l'ensemble des connaissances rassemblées jusqu'à ce jour sur ce sujet.

### **3.9.3 Niveau français : le Plan Santé Environnement et 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 dans le but de « contribuer à l'évaluation et à la gestion des risques liés aux polluants présents dans les espaces clos, d'identifier les substances, agents et situations qui, affectant la qualité de l'air, présentent un risque pour la santé de la population à ces polluants et de formuler en conséquence toutes les recommandations utiles à la conception et à l'utilisation des bâtiments ». Cet observatoire dépend des ministères de la Construction, de la Santé et de l'Ecologie.

Le Plan National Santé Environnement (PNSE) est un ensemble d'actions à mettre en œuvre selon 3 objectifs :

- garantir un air et une eau de bonne qualité
- prévenir les pathologies d'origine environnementale, notamment le cancer,
- mesurer, informer le public et protéger les populations sensibles (enfants, femmes enceintes, personnes âgées).

La première édition de ce PNSE a eu lieu sur la période 2004-2008 et a donné naissance à l'élaboration de Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (les FDES, abordées ci-dessous) pour les matériaux et produits de construction. Une deuxième édition de ce PNSE est actuellement en cours. Les actions du PNSE s'étendent aux logements, aux écoles, aux bureaux et aux lieux publics.

## **3.10 Les actions**

### **3.10.1 La classification des produits**

#### **Mise en place progressive de la classification**

Les substances chimiques sont étiquetées selon une classification précise dans le but principal de protéger les utilisateurs de ces produits. Les premiers utilisateurs des produits sont les salariés des entreprises de production, de transformation, de transport et/ou de mise en œuvre du produit. Selon l'agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement



et du travail (l'ANSES), en 2003, 2 370 000 salariés sont exposés dans leur travail à un ou plusieurs produits cancérogènes, soit 13,5% des salariés (ce qui représente une augmentation de l'exposition sur une période de 10 ans malgré la diffusion des protections collectives).

En Europe, la classification CMR (Cancérigène, substances Mutagènes, substances toxiques pour la Reproduction) entre en vigueur grâce aux directives n°67/548 CEE (datant de 1967) et n°1999/45 (datant de 1999). En 1992, le sommet de Rio donne naissance à un projet de système général harmonisé (SGH), dont l'objectif est d'établir « un système harmonisé mondialement de classification et d'étiquetage compatible, comportant notamment des fiches de sécurité et des symboles facilement compréhensibles ». Trois groupes de travail avancent sur ce thème et le Conseil Economique et Social des Nations Unies crée en 1999 le SGH. Le SGH est appelé à être appliqué dès que possible dans l'ensemble des pays. En Europe, la transition se fera selon plusieurs phases :

- jusqu'en 2010, entrée en vigueur du SGH, les deux systèmes (système européen CMR et système international SGH) peuvent être utilisés.
- jusqu'en 2015, les deux systèmes doivent être utilisés, les étiquettes comportant à la fois la classification européenne et la classification internationale.

### **Première classification : les CMR**

Sont classées les substances cancérogènes, mutagènes et toxiques.

Substances cancérogènes

- catégorie 1, C1 : substances cancérogènes,
- catégorie 2, C2 : substances cancérogènes probables (fortes présomptions),
- catégorie 3, C3 : substances cancérogènes possibles.

Substances mutagènes (substances induisant la mutation et la modification du matériel génétique d'un organisme)

- catégorie 1, M1 : substance mutagène pour l'homme,
- catégorie 2, M2 : forte présomption d'une action mutagène,
- catégorie 3, M3 : effets mutagènes possibles.

Substances toxiques pour la reproduction (substances à l'origine d'altération des fonctions ou de la capacité de reproduction, effets non héréditaires néfastes sur la descendance)

- catégorie 1, R1 : substance toxique pour la reproduction chez l'homme,
- catégorie 2, R2 : forte présomption d'une action toxique sur la reproduction,
- catégorie 3, R3 : substance préoccupante mais preuves insuffisantes.

Les études qui amènent à classer les produits en catégorie 1, 2 ou 3 sont les suivantes :

- catégorie 1 : données épidémiologiques prouvant l'existence d'une relation de cause à effet,
- catégorie 2 : résultats d'études à long terme sur les animaux,
- catégorie 3 : effets possibles mais substances insuffisamment étudiées.

Les catégories 1 et 2 doivent être accompagnées du symbole T (Toxique) et d'une phrase de risques « R » parmi les suivantes :

- R45 : peut provoquer le cancer,
- R49 : peut provoquer le cancer par inhalation,
- R46 : peut causer des altérations génétiques héréditaires
- R60 : peut altérer la fertilité,

- R61 : risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant,

Le pictogramme sur l'étiquette est le suivant :



FIGURE 3.16: Pictogramme T pour Toxique ou T<sup>+</sup> pour très toxique

La catégorie 3 doit être accompagnée du symbole Xn (Nocif) et d'une phrase de risque « R » parmi les suivantes :

- R40 : effet cancérigène suspecté, preuves insuffisantes,
- R68 : possibilité d'effets irréversibles (mutagène)
- R62 : risque d'altération de la fertilité,
- R63 : risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.

Le pictogramme sur l'étiquette est le suivant :



FIGURE 3.17: Pictogramme Xn pour nocif

L'ANSES travaille à la substitution des CMR des catégories 1 et 2 par des produits moins dangereux lorsque cela est possible.

### deuxième classification : le système général harmonisé

En Europe, ce système est entré en vigueur en 2009 et appelé le règlement CPL. Les catégories de danger 1, 2 et 3 deviennent respectivement les catégories 1A (potentiel avéré), 1B (potentiel supposé) et 2 (danger suspecté). Les pictogrammes évoluent. Les phrases de risques accompagnant la classification et le nouveau pictogramme qui suit sont :

- H340 : Peut induire des anomalies génétiques,
- H350 : peut provoquer le cancer,



FIGURE 3.18: Pictogramme GHS08 danger pour la santé humaine

- H360 : peut nuire à la fertilité ou au fœtus.

Cette classification s'applique pour les substances à partir du 1er décembre 2010 et pour les mélanges à partir du 1er juin 2015. C'est au fabricant ou à l'importateur que la fiche de données de sécurité incombe comprenant notamment les identifications du fournisseur, des substances, des dangers, les compositions, les différentes mesures à prendre, les protections en cas de manipulations, les données toxicologiques, écologiques, sur l'élimination du produit.

### 3.10.2 Le Règlement des Produits de Construction

Le règlement REACH (directive 89/106/CEE) est né en 2006 et laisse aujourd'hui la place au Règlement des Produits de Construction (le RCP), réglementation adoptée par le parlement européen en 2011 (305/2011) qui entrera en application au 1er juillet 2013 en remplacement de l'ancienne directive européenne établie en 2006 (89/106/CEE). Il s'agit d'harmoniser les exigences sur les produits de construction d'un point de vue sanitaire et environnemental : « les ouvrages de construction doivent être conçus et réalisés de manière à ne pas compromettre la sécurité des personnes, des animaux domestiques et des biens, et à ne pas nuire à l'environnement ».

Ainsi, les fabricants, importateurs et utilisateurs en aval doivent faire en sorte de fabriquer, mettre sur le marché ou utiliser des substances qui n'ont pas d'effets nocifs pour la santé humaine et l'environnement. Ils doivent élaborer un dossier d'enregistrement des substances chimiques utilisées dans leur produit (production à des quantités supérieures à une tonne). La réglementation de 2006, appelée aussi REACH énumérait déjà les substances dangereuses, la gamme va être étendue dans la nouvelle réglementation. Sont classées substances dangereuses et doivent respecter la procédure d'enregistrement les substances classées CMR de catégorie 1 et 2, des substances R50 et R53, des substances T/R48 et Xn/R48, des substances persistantes, bio-accumulables et toxiques (PBT), des substances très persistantes et très bio-accumulables (vPvB).

L'enregistrement d'une substance consiste à présenter une fiche de données de sécurité avec conseils d'utilisation, dossier technique et rapport sur la sécurité chimique. Parmi les pièces du dossier technique, doivent figurer la classification et l'étiquetage du produit. Le principe de cette classification et de cet étiquetage est de suivre un système général harmonisé (SGH) permettant d'avoir un référentiel international (abordé dans le paragraphe suivant).

### 3.10.3 Les FDES

Dès la première édition du PNSE, les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire ont vu le jour. Ces fiches sont recensées et référencées dans une base de données nationale, l'INIES.

On y retrouve l'ensemble des FDES émises par les fabricants. Le fabricant indique selon un format établi par la norme NF P 01-010 les caractéristiques environnementales et sanitaires du produit : impact GES, consommation en énergie grâce à une analyse de cycle de vie, émissions de COV, de particules, de radioactivités... Cette fiche est déclarative, elle peut être vérifiée par une tierce partie, ce qui est indiqué dans la fiche FDES dans ce cas. Ces fiches ont une utilité particulière pour des maîtres d'ouvrage ou équipes de maîtrise d'oeuvre qui se lancent dans la construction de bâtiment respectant certains critères (objectif HQE par exemple).

### 3.10.4 L'étiquetage

Le Grenelle de l'environnement avait décliné, parmi ses objectifs, « la réduction drastique d'émission et de la dispersion dans les milieux (air, eau, sols et sédiments) des polluants connus pour leur caractère nocif pour la santé » (groupe 3 du Grenelle de l'environnement « instaurer un environnement respectueux de la santé »). Suite au Grenelle de l'environnement et à la deuxième édition du PNSE (PNSE 2 sur la période de 2009-2013), le décret 2011-231 du 23 mars 2011 et l'arrêté du 19 avril 2011 ont rendu l'étiquetage des émissions en polluants volatils des produits de construction et de décoration obligatoire sur les produits nouveaux depuis le 1er janvier 2012 et sur tous les produits vendus en France à partir du 1er septembre 2013. L'étiquetage permet au consommateur d'identifier rapidement le degré d'émission du produit (tout comme il peut le faire sur les classes énergie déjà existantes). Ceci concerne tous les produits de construction et de décoration, même ceux qui n'émettent pas de COV de par leur composition (carrelage par exemple).

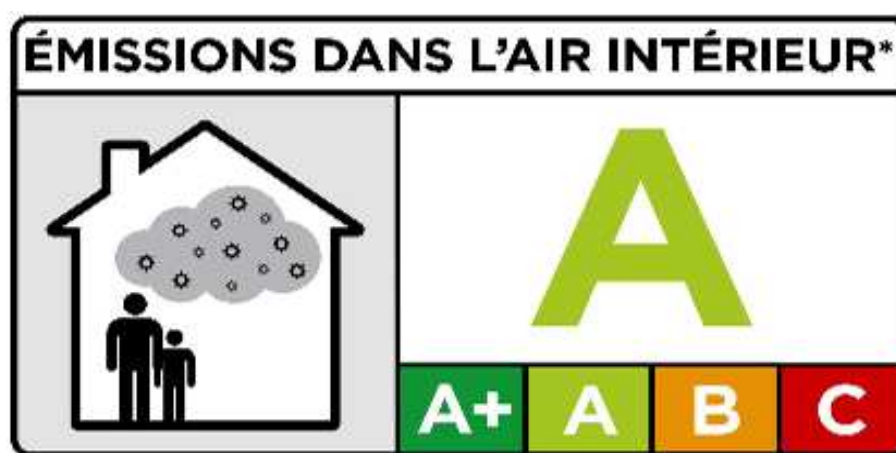


FIGURE 3.19: étiquette émission applicable sur les produits de construction, de décoration et de revêtement

Sont identifiées les émissions de COV du produit lorsqu'il est posé, incorporé ou appliqué dans une pièce. Il ne concerne donc que l'usager du bâtiment et non l'utilisateur du produit (travailleurs, bricoleurs...). Les classes sont déterminées si les émissions de COV ne dépassent pas les valeurs limites présentées dans le tableau ci-après, le test étant effectué après 28 jours selon la norme ISO 16000. Cette question de temps peut sembler très aléatoire : le consommateur n'est pas informé que c'est dans les premiers jours que le produit (la peinture qu'il pose sur un meuble

par exemple) émet le plus de COV et qu'il est indispensable de prendre toutes les précautions d'aération de la pièce ; par ailleurs, certains produits émettent sur une durée supérieure à un an, les émissions de COV peuvent ainsi être faibles, mais régulières dans le temps. Le tableau ci-dessous indique la méthode de classification.

| Classes                | C      | B      | A      | A+     |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| TVOC                   | > 2000 | < 2000 | < 1500 | < 1000 |
| 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   |
| Éthylbenzène           | > 1500 | < 1500 | < 1000 | < 750  |
| 2-Butoxyethanol        | > 2000 | < 2000 | < 1500 | < 1000 |
| Styrène                | > 500  | < 500  | < 350  | < 250  |

FIGURE 3.20: Valeurs limite d'émission de COV ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  testés selon la norme ISO 16000 après 28 jours

On prend dans ce tableau la classe la plus défavorable par rapport aux différentes émissions de COV relevées.

Notons cependant que le test n'est pas obligatoire. Cela permet à un fabricant ayant une large gamme de produits basés sur la même composition de reporter les résultats d'un test sur les autres produits de sa gamme.

### 3.10.5 Les valeurs guides de l'OMS et de l'OQAI

Les valeurs guides de qualité de l'air intérieur (VGAI) sont « des concentrations dans l'air d'une substance chimique en dessous desquelles 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. Elles visent ainsi à préserver la population de tout effet néfaste lié à l'exposition à cette substance. » (rapport VGAI-PM - Afsset - octobre 2009).

Les valeurs guides ne constituent pas des valeurs réglementaires, mais elles servent souvent de repère pour interpréter des résultats obtenus dans le cadre d'exposition aiguë ou d'exposition chronique par inhalation. (exposition aiguë = quelques minutes à plusieurs jours / exposition chronique = d'une durée supérieure à l'année). Il existe par ailleurs des valeurs réglementaires pour certaines substances (radon, monoxyde de carbone et amiante).

Différentes institutions en mesure de produire des valeurs guides :

- l'OMS dans le cadre des « Air Quality Guidelines »,
- le groupe de travail européen INDEX,
- l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, organisme sous la tutelle des pouvoirs publics et réunissant des équipes pluridisciplinaires.

Ces organismes produisent les valeurs guides sur la base de données toxicologiques, cliniques et épidémiologiques qui sont disponibles dans la littérature. L'Observatoire de la Qualité de l'Air (OQAI) est composé d'experts pluridisciplinaires (médecins, pharmaciens, ingénieurs hygiénistes, acteurs de la santé publiques, épidémiologistes, toxicologistes, physico-chimistes, techniciens du bâtiment, spécialistes de l'énergie et de la ventilation). Participent à ce travail d'expert l'ADEME, le CSTB, l'AFSSET et l'ANAH. En 2004, l'AFSSET s'est auto-saisie pour l'élaboration de valeurs guides pour la qualité de l'air intérieur en France (fondées sur des critères sanitaires). Pour ce faire, elle a mis en place un groupe de travail en 2005 en coopération avec le CSTB. Ce groupe de travail a soumis ses résultats au Comité d'Experts Spécialisés « Evaluation des risques liés aux milieux aériens ». Les valeurs guides produites par l'Afsset à ce jour sont relevées dans le tableau suivant :

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

FIGURE 3.21: Valeur guides recommandées par l'Afsset et publiées à ce jour

Les campagnes de mesure de l'OQAI ont permis d'identifier les niveaux d'émission suivants dans les chambres des 554 logements étudiés : concentrations en formaldéhyde variant de 1,3 à 86,3  $\mu\text{g.m}^{-3}$  avec une médiane à 19,6  $\mu\text{g.m}^{-3}$ . Ces valeurs vont bien au-delà de la valeur toxique de référence fixée à 3  $\mu\text{g.m}^{-3}$  et de la valeur guide proposée par l'Afsset 10  $\mu\text{g.m}^{-3}$ .

### Les particules

Concernant les particules, , en raison de documentations encore peu nombreuses sur le sujet, l'Afsset se repose sur les valeurs guides proposées par l'OMS qui statue pour les expositions chroniques sur une valeur guide annuelle de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM 2,5 et une valeur guide annuelle de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM 10 et pour les effets sanitaires à court terme (exposition aiguë), sur des valeurs guides 24 heures égales à 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM 2,5 et à 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les PM 10.

## le CO<sub>2</sub>

Le CO<sub>2</sub> ne fait pas partie des valeurs guides. En effet, il ne s'agit pas d'une production de polluant liée à un matériau mais à l'occupation humaine et au plus ou moins bon renouvellement de l'air. Il n'est pas toxique, mais devient gênant au-delà de 2000 ppm, entraînant fatigue, somnolence et maux de tête, et au-delà d'une certaine concentration, il peut s'avérer réellement nocif (accélération de la respiration pour 2,5% du volume d'air, évanouissements et convulsions pour 10 à 15 % du volume d'air, mort pour plus de 20% de CO<sub>2</sub> en volume).

L'OMS recommande ainsi une valeur limite de 1000 ppm en intérieur pour une valeur de 400 ppm à l'extérieur. La France est plus tolérante (1 300 ppm dans les locaux intérieurs). La campagne de l'OQAI a permis d'identifier les niveaux moyens de ppm relevés dans les logements. Pour 50% des logements, les valeurs moyennes sur la semaine dépassent 756 ppm, le maximum des valeurs moyennes glissantes sur 1 heure est de 1 668 ppm et la concentration au cours de la nuit est égale à 1 193 ppm. Ces valeurs sont donc relativement élevées et présentent une qualité de l'air plutôt moyenne. La qualité de l'air devient réellement problématique pour 5% des logements étudiés, pour lesquelles les valeurs précédentes sont respectivement 1484 ppm, 4450 ppm et 3244 ppm.

Une norme européenne permet d'évaluer la qualité de l'air intérieur selon le niveau constaté de CO<sub>2</sub> dans un espace intérieur et en calcule le renouvellement de l'air associé. Cette classification de la qualité de l'air est basée sur la différence de teneur en CO<sub>2</sub> extérieure et intérieure. La norme NBN EN 13779 est présentée dans le tableau suivant.



| Qualité de l'air  | Taux de CO <sub>2</sub> au-dessus du niveau extérieur | Débit d'air neuf extérieur        |
|-------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Excellente (IDA1) | < 400 ppm                                             | > 54 m <sup>3</sup> /h.pers       |
| Moyenne (IDA2)    | 400-600 ppm                                           | de 36 à 54 m <sup>3</sup> /h.pers |
| Acceptable (IDA3) | 600-1 000 ppm                                         | de 22 à 36 m <sup>3</sup> /h.pers |
| Médiocre (IDA4)   | > 1 000 ppm                                           | < 22 m <sup>3</sup> /h.pers       |

FIGURE 3.22: Classification de l'air intérieur d'après la norme NBN EN 137-79

Le débit d'air associé est calculé ainsi :

- les occupants émettent 20 l/h de CO<sub>2</sub>,
- L'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> par rapport à l'extérieur indique ainsi le taux de renouvellement de l'air grâce à ma formule suivante :

$$\text{Debit d'air renouvelé (m}^3/\text{h)} = \frac{\text{Debit massique d'émission de CO}_2 \text{ en g/h}}{\text{exces de CO}_2 \text{ en g/m}^3}$$

sachant que la masse molaire du CO<sub>2</sub> = 44 g et que le volume d'une mole = 22,4 l

On obtient par exemple pour une personne occupante et pour 1000 ppm mesurées, le débit d'air neuf associé suivant :

$$\text{Debit d'air neuf} = \left( \frac{20 \times 44}{22,4} \right) / \left( \frac{1 \times 44}{22,4} \right) = 20$$

### 3.10.6 le projet IAIAQ de l'Europe

Le projet IAIAQ, dans la continuité du projet EnVIE (2003-2008), a pour but de développer un outil d'évaluation des relations quantitatives entre la qualité de l'air intérieur liée à des maladies et symptômes, les substances en présence dans l'air intérieur causant ces maladies, les sources intérieures et extérieures créant l'exposition à ces substances et l'impact des politiques pour contrôler ces sources. L'indicateur étant les années de vie corrigées de l'incapacité (AVCI). Le projet IAIAQ utilise cet outil après adaptation du modèle créé lors du projet EnVIE et mise à jour des bases de données (prise en compte de 26 pays européens). L'objectif principal est de comprendre l'impact sur la santé que peuvent avoir les politiques relatives à la qualité de l'air intérieur et de préparer ainsi les futures politiques sur ce sujet.

On aurait pu attendre que les directives européennes sur l'efficacité énergétique prennent en compte de tels paramètres. En effet, la ventilation prend une part importante dans les déperditions de chaleur et donc dans l'efficacité énergétique. La directive européenne de 2002 (Directive 2002/91/EC) introduit pour la première fois la ventilation comme un élément déterminant dans la construction d'un bâtiment énergétiquement performant. Cela reste vrai dans la directive européenne de 2010 (Directive 2010/31/EC). Mais la ventilation joue également un rôle sur la qualité de l'air intérieur. Malheureusement, aucun lien n'est fait, sauf pour le Portugal, seul pays qui introduit la qualité de l'air dans sa réglementation thermique (Jantunen & al [17]). La recherche de la qualité énergétique d'un bâtiment peut donc se faire au dépend de la qualité de l'air intérieur.

### **3.10.7 Incitations pour des constructions plus saines**

Les réglementations thermiques françaises ne mettent pas en avant la qualité de l'air intérieur. En revanche, un maître d'ouvrage qui souhaiterait prendre en compte de tels critères peut construire son projet sur la base de certifications.

#### **Le label HQE**

Un bâtiment HQE est un bâtiment respectant les critères d'une démarche de Haute Qualité Environnementale. Cette démarche est encadrée par un système de management environnemental qui s'appuie des cibles de qualité à atteindre pour le projet de construction. Ces cibles sont au nombre de 14, chacune de ces cibles doit être satisfaite avec un niveau plus ou moins élevé. Le profil de la construction est défini en fonction du niveau attendu dans chacune des cibles : 3 cibles niveau « Très performant », 4 cibles niveau « Performant » et 7 cibles niveau « Base ». La qualité de l'air fait partie de ces cibles (gestion des matériaux, système de ventilation). Les émissions de COV et les pollutions liées au traitement du bois doivent être limitées, une information sur les critères sanitaires et environnementaux des produits de construction est obligatoire, la pénétration des polluants extérieurs doit faire l'objet d'une prévention, les débits d'air doivent être adaptés à l'activité du local. Les valeurs limites d'émission de polluants correspondent aux maximum aux valeurs guides et sont pour certaines inférieures à ces valeurs guides. Cette cible est malheureusement encore peu souvent traitée.

Comme toute démarche environnementale, celle-ci impose un surcoût à la construction. Cependant, une partie de ce coût est financé par l'Etat étant donné l'intérêt économique que ces bâtiments peuvent avoir pendant leur durée de vie. En effet, le bâtiment présente des économies annuelles relatives à son fonctionnement par rapport à un bâtiment classique. L'Agence Régionale de l'Environnement et de l'Energie d'Île de France a réalisé un chiffrage de ces économies. Une conséquence est le maintien des impôts sans nécessité de les augmenter pour financer le fonctionnement de ces bâtiments.

| Economies de fonctionnement cumulées sur 10 ans |                     |                     |                          |                     |                     |
|-------------------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
|                                                 | Logement individuel | Logement social     | Logement collectif privé | Bureaux             | Bâtiments scolaires |
| Neuf                                            | 34 €/m <sup>2</sup> | 38 €/m <sup>2</sup> | 31 €/m <sup>2</sup>      | 16 €/m <sup>2</sup> | 24 €/m <sup>2</sup> |
| Réhabilitation                                  | 28 €/m <sup>2</sup> | 24 €/m <sup>2</sup> | 23 €/m <sup>2</sup>      | 23 €/m <sup>2</sup> | 17 €/m <sup>2</sup> |

FIGURE 3.23: Estimation des économies annuelles liées au fonctionnement d'un bâtiment HQE - chiffrage réalisé par l'ARENE

### La certification Habitat et Environnement

Cette certification propose plusieurs profils et dans ces profils, les notes 1, 3 et 5 peuvent être attribuées. Les profils sont les suivants :

- Profil A : Tous les thèmes sont satisfaits,
- Profil B : Thème « Confort et santé » non satisfait,
- Profil C : Thème « Eau » non satisfait,
- Profil D : Thème « Filière constructive - Choix des matériaux » non satisfait,
- Profil E : Thème « Chantier propre » non satisfait.

Mis à part le profil B, tous les profils nécessitent de satisfaire le thème « Confort et santé » (thème 6). Ce thème comporte différents critères plus ou moins contraignants. Les matériaux utilisés doivent présenter une fiche FDES. Cette fiche permet d'avoir les caractéristiques environnementales du produit mais ne pose pas de limite. Les matériaux doivent cependant disposer d'une classe d'émission de COV B. Mais selon Suzanne Déoux, Docteur en médecine, consultante en ingénierie de la santé dans le cadre du bâti et urbain, professeur associé à l'Université d'Angers ([9]), « Les contraintes relatives aux émissions de formaldéhyde des différentes familles de produits de second œuvre ne sont pas suffisantes surtout lors de la mise en place d'un des systèmes de ventilation proposé à savoir, l'hygroréglable. La réduction des débits tolérée avec

cet équipement, pour des raisons uniquement énergétiques, imposerait des produits à très faibles émission de formaldéhyde ».

Concernant le système de ventilation, aucun mode particulier n'est imposé. Par exemple : il est proposé de lutter contre le développement des moisissures par une ventilation hygroréglable ; si les allergènes extérieurs sont traités par des filtres, il est demandé au maître d'ouvrage de s'engager sur le changement régulier des filtres ; la ventilation double flux est préconisée dans le cadre de la prise en compte du radon (surpression des locaux). En revanche l'installation du système doit respecter certaines règles de mise en œuvre : conduits rigides, produits d'étanchéité de classe C, accessibilité pour l'entretien du système et du réseau, dimensionnement du système suffisant par rapport au logement, contrôle de l'installation avant livraison. Par ailleurs, il est demandé que l'évacuation de l'humidité liée au séchage du linge soit réalisée indépendamment de l'extraction de la cuisine, de la salle de bain et des WC.

### **le label BREEAM**

Le label BREEAM est un label anglais créé en 1990. Il est largement répandu dans le monde. En fonction de la qualité de la conception, des points sont attribués dans les différentes thématiques et une note globale est ensuite donnée permettant de donner le niveau du label obtenu (allant de Passable à Exceptionnel). La qualité de l'air est traitée suivant deux aspects :

- prises d'air située à plus de 20 m de toute source de pollution extérieure,
- installation d'un détecteur de  $CO_2$ ,
- classe d'émission de formaldéhyde E1 de structures en bois (émissions inférieure à  $125 \mu g/m^3$  selon la norme EN 717-1),
- absence de substances cancérigènes dans les produits de pose.

Les émissions de COV ne sont pas très restreintes. Mais la modulation de la ventilation selon le niveau de  $CO_2$  est éloigné de nos habitudes en France et la pertinence de ce choix sera repris dans la troisième partie.

## **3.11 les chiffres de la qualité de l'air intérieur**

La qualité de l'air est un enjeu majeur aujourd'hui en raison de la nette progression des maladies qui lui sont attribuées. L'OQAI considère aujourd'hui, sur la base d'études épidémiologiques, que 25 à 30% de la population des pays industrialisés sont touchés par des maladies allergiques et que 13% des enfants de 11 à 14 ans en France ont déjà eu de l'asthme (coût du traitement de l'asthme estimé entre 200 et 800 millions d'euros par an). La qualité de l'air intérieur n'est pas la seule responsable de ces maladies et il est d'ailleurs difficile d'établir clairement les associations, comme nous avons pu le voir précédemment. Est-il possible de chiffrer l'impact de la qualité de l'air intérieur ? Les Etats-Unis se sont déjà penchés sur cette question et ont pu identifier une méthode de calcul. Cette méthode a été reprise en 2004, en France par l'Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Energies d'Île-de-France. L'impact financier a donc été évalué, dans un premier temps, comme présenté dans le tableau suivant.

| Cibles                                                                                                        | Impact financier en milliards d'€ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Réduction des maladies respiratoires                                                                          | 1 à 2                             |
| Réduction des allergies et de l'asthme (diminution de 8 à 25 % des symptômes dans les populations concernées) | 0,1 à 0,5                         |
| Réduction de 20 à 50 % des symptômes associés au <u>SyndromBuilding Sick</u>                                  | 1,2 à 4,5                         |
| <b>Total des économies de santé</b>                                                                           | <b>2,3 à 7</b>                    |

FIGURE 3.24: Economies potentielles sur les dépenses de santé liées à la qualité de l'air intérieur (ARENE Ile de France)

Ce chiffrage a été repris depuis, l'évaluation a été affinée, le sujet étant de mieux en mieux connu et identifié, les études étant plus nombreuses et plus précises. L'OQAI fait part sur son site des chiffres suivants : « le coût des effets d'une mauvaise qualité de l'air intérieur en France, calculés selon les indicateurs globaux de détriment sanitaire utilisés par l'OMS, sont aujourd'hui estimés entre **12,8 et 38,4 milliards d'euros** par an. » (Source :site [www.oqai.fr](http://www.oqai.fr)) Rappelons que le déficit de la sécurité sociale s'élève à 18,1 milliards d'euros en 2011. Au-delà de l'éthique de la santé, ces chiffres traduisent l'intérêt réel de travailler sur une réduction drastique des pollutions de l'air intérieur. La première action est bien la réduction à la source de ces pollutions, car nous avons pu le voir précédemment, les comportements de chacun dans son logement sont difficiles à contrôler. La deuxième action consiste à assurer un renouvellement de l'air intérieur suffisant, parce que certaines pollutions ne peuvent être réduites et parce que celles qui peuvent l'être restent malgré tout présentes.



## Chapitre 4

# La ventilation d'un logement

La ventilation d'un logement a plusieurs rôles : elle assainit l'ambiance, par un apport d'air neuf et l'extraction de l'air vicié, et permet de limiter les risques de surchauffe estivale en renouvelant l'air intérieur. En France, c'est au cours des années 30 qu'apparaissent les premiers règlements sanitaires traitant de la ventilation. Ces textes ont peu à peu évolué vers une réglementation nationale pour donner naissance en 1982 à l'arrêté qui régit encore aujourd'hui nos systèmes de ventilation dans les logements.

Depuis, les problématiques liées à l'énergie sont venues peser sur la question du renouvellement de l'air. Certains systèmes de ventilation, selon le mode de régulation, ont pu diminuer les débits d'air assurés dans le logement au travers d'avis techniques acceptés dans la réglementation thermique française. Alors que l'on pourrait se demander si les débits actuels sont suffisants, les logements neufs sont de plus en plus équipés de systèmes qui ventilent moins, permettant ainsi de diminuer les factures énergétiques. Cependant, la qualité de l'air et les résultats des récentes études et groupes de travail n'ont donné lieu à aucun changement sur la prise en compte des débits de ventilation. Est-ce que le texte de 1982 est toujours pertinent ? La réglementation thermique a-t-elle un impact sur les choix de conception et sur la santé des occupants ?

### 4.1 Les textes

1er avril 1937 : le ministre de la santé demande par un arrêté à tous les préfets d'instaurer un règlement sanitaire départemental sur la base du règlement sanitaire départemental type. Il impose une aération pièce par pièce, soit sur le principe d'une grande ouverture en façade, soit sur le principe de deux grilles, l'une en partie basse, l'autre en partie haute. Dans son règlement sanitaire départemental, Paris impose un conduit individuel de ventilation en cuisine. Les pièces principales dans lesquelles se trouvent un appareil à combustion doivent être munies d'une grille d'aération de section libre de 100 cm<sup>2</sup>. Les pièces de service équipées d'un appareil à combustion doivent disposer d'un système de « ventilation basse, ventilation haute » équipées d'une grille d'aération de section libre de 100 cm<sup>2</sup>.

En 1955 puis 1958, un arrêté ministériel autorise la mise en place du conduit collectif à raccordement individuel par hauteur d'étage (conduit shunt) dans le cas de chauffage centralisé. Par ailleurs, un seul conduit (voire deux à partir du T3) peut être installé en cuisine, toujours dans le cas de chauffage centralisé. En revanche, si le chauffage est réalisé à partir d'appareils à combustion dans les différentes pièces principales, chaque pièce principale doit conserver son conduit d'évacuation des fumées. Enfin, les WC et salle de bains sont ventilés à part grâce à un système « ventilation basse/ ventilation haute ». L'air extrait en cuisine est compensé par les

défauts d'étanchéité au travers de l'enveloppe. L'aération des pièces principales se fait par pièce et par l'ouverture des ouvrants.

L'arrêté ministériel du 22 octobre 1969 prévoit l'obligation d'une ventilation générale et permanente. Le balayage du logement doit se faire depuis les pièces sèches, équipées d'entrées d'air vers les pièces humides. Les WC et salles de bain qui disposent d'ouvrants n'ont pas obligation de disposer de conduits de ventilation. Lorsqu'un conduit doit être mis en œuvre, il peut être de type Shunt.

L'article R.111-9 du Code de la Construction et de l'Habitation précise que « les logements doivent bénéficier d'un renouvellement de l'air et d'une évacuation des émanations tels que les taux de pollution de l'air intérieur du local ne constituent aucun danger pour la santé et que puissent être évitées les condensations ».

Le texte qui régit la ventilation des logements en France aujourd'hui date de 30 ans. Il s'agit de l'arrêté du 29 mars 1982 (modifié en 1983), toujours basé sur le principe d'une ventilation générale et permanente dans les logements neufs, et ce au minimum durant la période où la température extérieure oblige à maintenir les fenêtres fermées. Le balayage de l'ensemble des pièces doit être assuré, depuis les pièces sèches vers les pièces humides, avec possibilité de passer par des circulations. Il ne doit pas y avoir de risque de refoulement de l'air vicié vers les pièces de service. La ventilation peut être naturelle ou mécanique. Dans les deux cas, elle doit assurer un débit minimal dans l'ensemble du logement, mais également par type de pièce. Le système et la taille des conduits doivent être conçus pour permettre l'extraction des débits maximaux, systèmes et bouches d'entrée et d'extraction prévues faire circuler des débits minimaux. Ces débits sont détaillés dans les tableaux ci-après.

| Débits extraits minimaux (m³/h)              |         |                                                      |                   |           |             |
|----------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| Nombre de pièces principales de l'habitation | Cuisine | Salle de bains ou de douches communes ou non avec WC | Autre salle d'eau | WC unique | WC multiple |
| 1                                            | 75      | 15                                                   | 15                | 15        | 15          |
| 2                                            | 90      | 15                                                   | 15                | 15        | 15          |
| 3                                            | 105     | 30                                                   | 15                | 15        | 15          |
| 4                                            | 110     | 30                                                   | 15                | 30        | 15          |
| 5 et plus                                    | 135     | 30                                                   | 15                | 30        | 15          |

FIGURE 4.1: Débits minimaux à extraire - arrêté 1982

Lorsqu'il existe un système mécanique de ventilation, par une modification datant de 1983, l'arrêté indique que ces débits peuvent être réduits, sous les conditions indiquées dans le tableau suivant.



| Débits (m3/h)                   | Nombre de pièces principales |    |    |    |     |     |     |
|---------------------------------|------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|
|                                 | 1                            | 2  | 3  | 4  | 5   | 6   | 7   |
| Débit total minimal du logement | 35                           | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 |
| Débit minimal en cuisine        | 20                           | 30 | 45 | 45 | 45  | 45  | 45  |

FIGURE 4.2: Débits minimaux à extraire avec la présence d'un système mécanique - modification 1983

Notons qu'entre l'arrêté de 1969 et l'arrêté de 1982, les chocs pétroliers ont impacté les modes de construction par un recours plus importants aux matériaux isolants et à une amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe. Ceci a eu pour conséquence la mise en place de règle importante en matière des débits maîtrisés. Depuis 1982, certains systèmes, en raison de leur mode de régulation sur l'humidité, ont pu disposer d'avis techniques réduisant encore les débits à extraire dans les logements.

## 4.2 Les systèmes de ventilation

Différents systèmes de ventilation permettent de respecter l'arrêté de 1982. La ventilation simple flux est le système de plus répandu dans logements aujourd'hui en France. Il peut s'agir de ventilation naturelle, de Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) autoréglable ou de VMC hygroréglable (régulée sur l'humidité relative). La VMC double flux s'impose difficilement sur le marché français du logement. On retrouve plus souvent ce système dans le tertiaire, là où les débits sont plus importants et là où un budget peut y être consacré. Nous présentons ci-après le fonctionnement de ces systèmes, les contraintes éventuelles, les avantages.

### 4.2.1 la ventilation naturelle

La ventilation naturelle s'effectue grâce aux différences de pressions et de température entre l'intérieur et l'extérieur et au sein du réseau de ventilation. Les deux forces motrices sont le tirage thermique et le vent. Les débits dépendent donc fortement des conditions extérieures du site.

#### Le vent

Le vent agit sur les parois en appliquant une pression sur les façades face au vent et en induisant une pression négatives sur les façades sous le vent et sur le toit. Le trajet naturel de l'air est donc le suivant : introduction dans les zones de haute pression et débouché vers les zones

de basse pression. En toiture, il est important que le système n'implique des surpressions sur le débouché mais au contraire facilite l'extraction des débits par un extracteur statique (voire statomécanique).

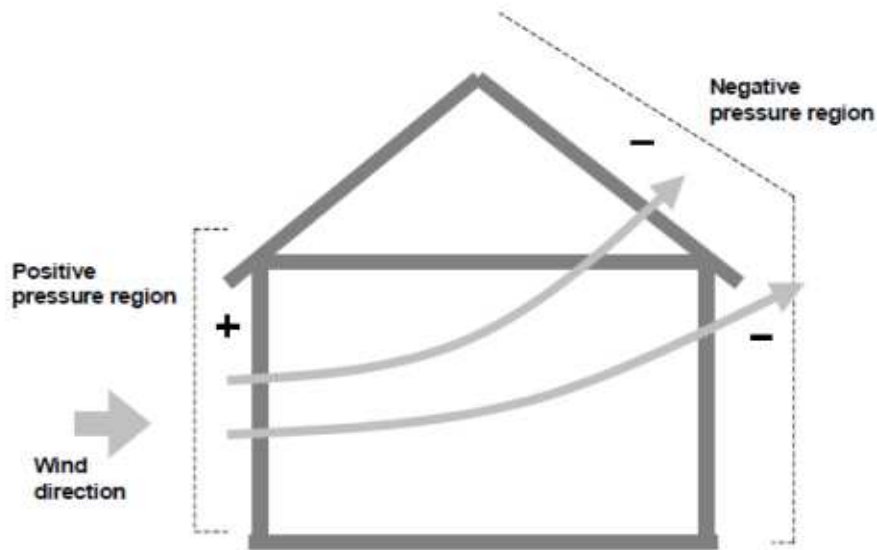


FIGURE 4.3: pression du vent sur les parois

### Le tirage thermique

Il existe une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et à l'intérieur du logement, entre les différentes strates d'air. L'air plus froid présente une densité plus lourde. Le gradient de pression permet donc une circulation de l'air depuis l'extérieur et à l'intérieur du logement jusqu'au conduit extérieur.

La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur peut être retrouvée à partir de l'équation de Bernoulli.

Ainsi

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Pression statique}} + \Delta P_{\text{Pression dynamique}} + \Delta P_{\text{Pression hydrostatique}}$$

Chacune de ces pressions se décompose ainsi :

$\Delta$  Pression statique, la différence entre la pression atmosphérique de l'extérieur et celle de l'intérieur,

$\Delta$  Pression dynamique, l'effet du vent sur les parois :

$$\Delta \text{ Pression dynamique} = 1/2 \times \rho_{\text{ext}} \times V_{\text{vent}}^2 \times C_p$$

$\Delta$  Pression hydrostatique, l'effet du tirage thermique :

$$\Delta \text{ Pression hydrostatique} = \Delta \rho \times g \times (-h)$$

avec  $\rho$ , la masse volumique de l'air intérieur ou extérieur,  $V_{vent}$ , la vitesse de vent dans la direction donnée,  $C_p$ , le coefficient de pression sur la façade donnée,  $g$ , l'accélération de la pesanteur et  $h$ , la différence de hauteur entre le point intérieur et le point extérieur de référence.

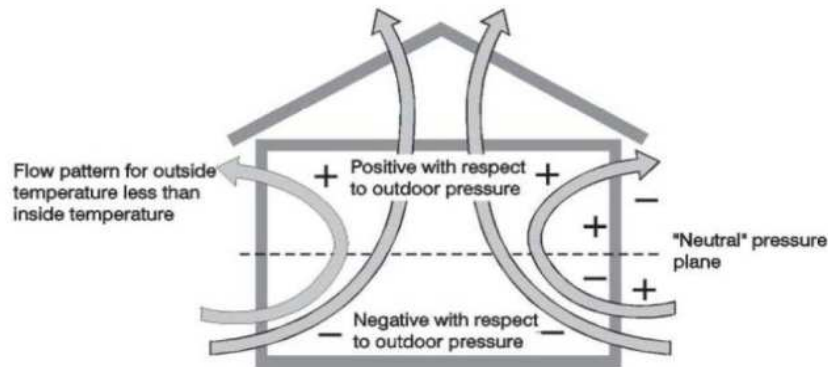


FIGURE 4.4: principe du tirage thermique

Les coefficients de pression traduisent la forme et la hauteur du bâtiment. Ils sont données pour un angle du vent sur chaque paroi. Ainsi ils permettent de faire apparaître les pressions positives (façades face au vent) et les pressions négatives (façades sous le vent). Le débit à prendre en compte à partir de cette différence de pression obtenue entre l'intérieur et l'extérieur dépend ensuite de l'écoulement et donc de l'orifice mis en oeuvre pour l'entrée et/ou l'extraction d'air. Une entrée d'air fixe, autoréglable ou hygroréglable n'adaptera pas sa section de la même façon en fonction de son mode de régulation (différence de pression, hygrométrie).

$$\dot{m}_{air} = C_{bouches} \times \Delta P$$

L'air neuf est donc introduit par des grilles de section adaptée au débit souhaité. En logement, ces grilles ont une section de  $10 \text{ cm}^2$  par  $\text{m}^2$  de plancher du local. Ces grilles peuvent être hygroréglables. Dans ce cas, leur section varie de  $10$  à  $30 \text{ cm}^2$  pour une plage d'humidité relative de  $30$  à  $60 \%$ . L'air neuf introduit se mélange à l'air vicié en passant des pièces les moins polluées (pièces principales) et en transitant par les espaces prévus à cet effet (bas de porte généralement) jusqu'à l'extraction en pièce humide. Là aussi, les grilles peuvent être hygroréglable (section de  $15$  à  $75 \text{ cm}^2$  pour une plage d'humidité relative de  $40$  à  $75 \%$ ). L'évacuation se fait par des conduits de tirage naturel grâce au tirage thermique et / ou aux effets du vent en haut du conduit.

La ventilation naturelle peut également être assistée. On parle de ventilation hybride. Dans ce cas, la ventilation est assistée mécaniquement sur une période pré-déterminée. Cela peut

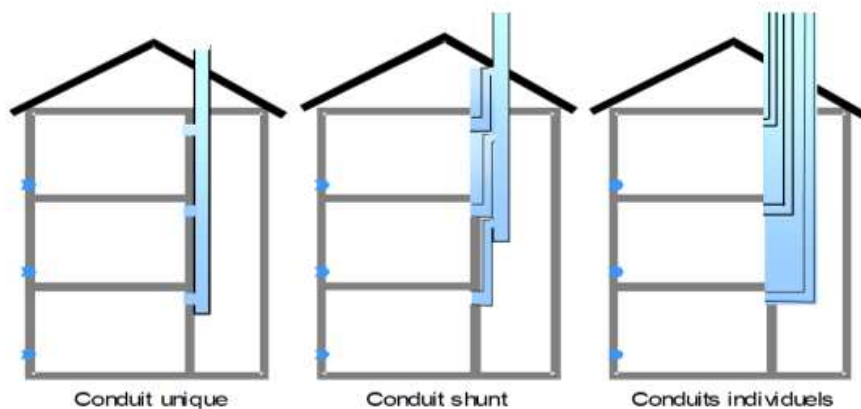


FIGURE 4.5: conduits d'extraction en ventilation naturelle

correspondre à des saisons, ou encore à des heures précises de la journée (ventilation mécanique occupation, ventilation naturelle hors occupation et pendant la nuit). Cette période peut aussi se faire en fonction des conditions extérieures : tirage thermique et/ou extraction statique insuffisants.

#### 4.2.2 la ventilation mécanique simple flux

Dans la plupart des cas, le ventilateur assure l'extraction de l'air vicié. Les éléments composant l'équipement sont les suivants :

- des entrées d'air placées en façades ou sur les menuiseries des pièces sèches,
- des portes intérieures détalonnées permettant à l'air de circuler des points d'entrée vers les points de sortie,
- des bouches d'extraction placées dans les pièces humides,
- un groupe d'extraction relié aux bouches d'extraction et à la sortie (généralement en toiture) par des gaines. Ce groupe d'extraction met le logement en dépression par rapport à l'extérieur.

La figure suivante représente le principe décrit ci-dessus.

Les avantages d'un tel système sont les suivants :

- La mise en dépression des locaux permet d'éviter les surpressions sur les parois liées à l'humidité et limite ainsi les risques de dégradation du bâtiment.
- Il est possible d'imaginer une régulation des débits, notamment en fonction de l'humidité (système qui se répand aujourd'hui en France).

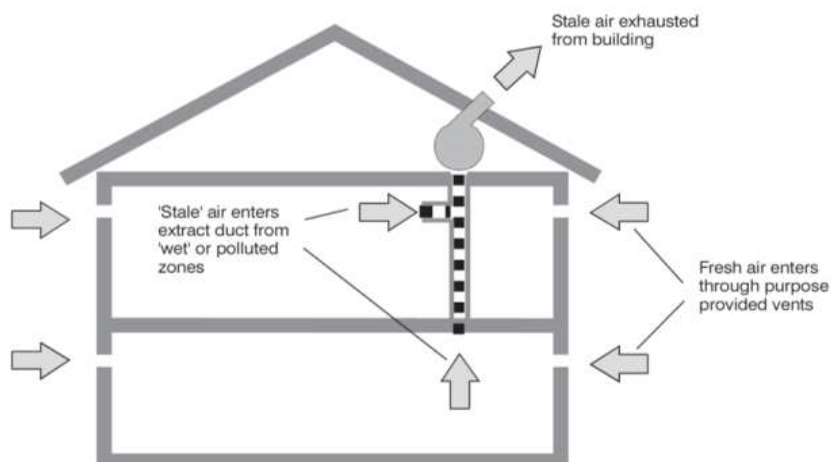


FIGURE 4.6: schéma de principe de la ventilation mécanique simple flux

- En logement, cette installation est simple et dans la plupart des cas, elle n'implique pas la création de soffites ou faux-plafonds pour le passage des gaines (ce qui sera plutôt le cas d'une ventilation double-flux).

Cependant, le système d'amenée d'air statique ne permet pas de traiter la qualité de l'air extérieur avant son entrée dans le logement, ni de traiter parfaitement l'isolement acoustique dans le cas de zones de nuisances sonores. Par ailleurs, à son arrivée dans le logement, l'air neuf est à la température de l'air extérieur, ce qui peut créer des sensations de courants d'air froid pour les occupants ainsi que générer des déperditions par renouvellement de l'air. Il existe également le système de ventilation par insufflation. Ce système n'est pas beaucoup utilisé. Il présente l'avantage de filtrer l'air extérieur avant son entrée dans le logement et de mettre le logement en surpression, limitant ainsi les risques de pollution par radon. Cependant, la mise en surpression présente aussi des inconvénients en terme d'évacuation des polluants.

En France, on retrouve généralement deux systèmes de régulation sur la VMC simple flux :

- la ventilation autoréglable qui assure un débit constant dans chacune des bouches, quelques soient les variations de pression,
- la ventilation hygroréglable basée sur une régulation des débits en fonction du taux d'humidité du logement.

#### 4.2.3 la ventilation mécanique simple flux hygroréglable

La ventilation hygroréglable fonctionne selon le même principe que la ventilation autoréglable et ajoute à ce système une modulation des débits selon le taux d'humidité dans le logement. Ce système a été créé précisément pour réduire les débits d'air au minimum, limitant ainsi les déperditions par renouvellement de l'air. On retrouve deux systèmes :

- la ventilation hygroréglable de type A, dite l'hygro A

- la ventilation hygroréglable de type B, dite l'hygro B.

Le système de l'hygro A dispose de bouches d'extraction hygroréglables. En fonction du taux d'humidité présent dans la pièce de service, la bouche adapte son ouverture par l'allongement ou le rétrécissement d'une tresse de nylon. Les WC disposent d'un module de temporisation souvent actionné sur détection de présence. L'humidité peut provenir de l'extérieur, de pièce sèche à proximité ou de la pièce de service elle-même. L'avantage de ce système est de proposer un débit supplémentaire localisé en fonction du besoin.

Le système hygro B dispose également de bouches d'extraction hygroréglables, ainsi que de bouches d'entrée d'air hygroréglables, réduisant encore les débits de ventilation au strict minimum. L'air neuf entre ainsi prioritairement dans les pièces principales où se déroulent une activité générant de l'humidité. Ce qui ajoute l'avantage de distribuer l'air en fonction de l'occupation de la pièce et de limiter l'impact des pressions sur les parois comme cela peut être le cas avec une ventilation hygro A. Par exemple, au cours de la nuit, les chambres, dans lesquelles sont dégagées de l'humidité par la respiration des occupants, seront proportionnellement plus ventilées que le salon. Cependant, tant que cette humidité n'est pas parvenue jusqu'aux pièces humides, l'extraction sera toujours établie selon le débit minimal. Ce décalage d'extraction dans le temps réduit l'efficacité du système de ventilation sur l'évacuation des polluants et le renouvellement de l'air.

#### 4.2.4 la ventilation mécanique double flux

Ce système consiste à introduire mécaniquement de l'air neuf et à extraire mécaniquement de l'air vicié. Les deux ventilateurs sont réunis dans un même caisson qui abrite un échangeur. Le passage de l'air vicié dans l'échangeur permet de préchauffer l'air neuf, limitant ainsi les déperditions énergétiques liées au renouvellement de l'air.

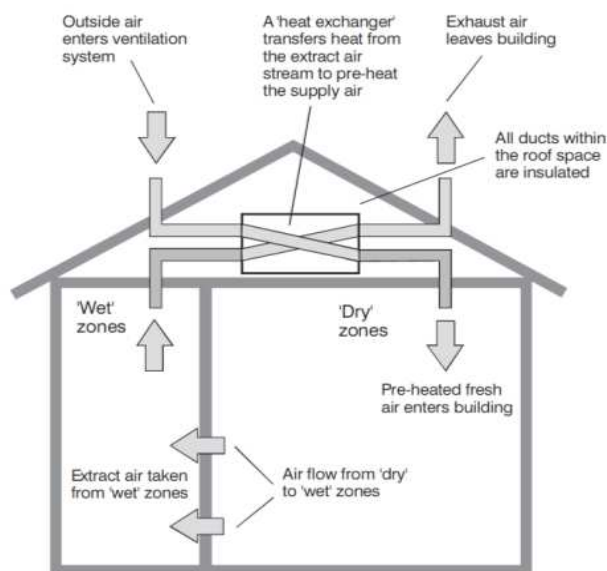


FIGURE 4.7: Schéma de principe de la ventilation mécanique double flux

Dans le respect de l'arrêté de 1982, le soufflage se fait dans les pièces principales, l'extraction se fait dans les pièces humides.

Les échangeurs utilisés dans les caissons de ventilation double flux sont des échangeurs à plaques, des échangeurs rotatifs, des batteries à eau glycolée, des récupérateurs caloducs ou des échangeurs thermodynamique. Le rendement (ou efficacité) est déterminé ainsi :

$$\epsilon = (T_2 - T_1) / (T_3 - T_1)$$

avec  $T_1$  la température de l'air neuf,  $T_2$ , la température de l'air soufflé et  $T_3$ , la température de l'air repris.

Un échangeur à plaques est composé de plaques fines disposées parallèlement entre lesquelles des veines d'air passent. La disposition est telle que chaque plaque sépare deux flux différents (l'air neuf et l'air vicié). Un échangeur à plaque devient plus efficace lorsque les plaques permettent une turbulence (plaques gaufrées) et lorsque les flux sont à contre-courant. On peut atteindre de très bon rendement sur ces échangeurs (supérieurs à 90%)

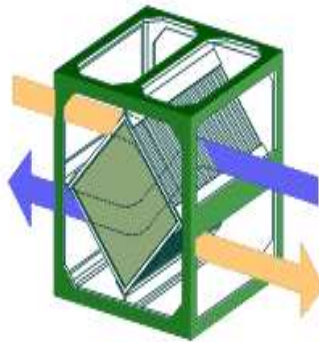


FIGURE 4.8: échangeur à plaques

Un échangeur rotatif est composé d'une structure lourde en nid d'abeille qui accumule la chaleur de la veine chaude pour la restituer à la veine froide. Le rendement est également élevé sur ce type d'échangeur (souvent plus de 75%).

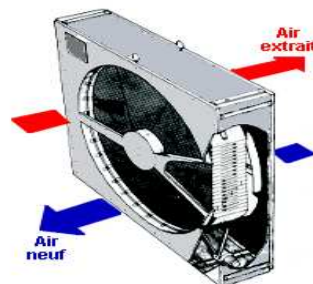


FIGURE 4.9: échangeur rotatif

Un échangeur à caloduc utilise un fluide diphasique qui se s'évapore dans la source chaude pour se condenser dans la source froide. L'efficacité de ce système n'est que de 50%.

Les batteries à eau glycolée sont alimentées par une boucle d'eau qui assure l'échange de chaleur entre deux batteries, l'une en source chaude, l'autre en source froide.

Enfin, l'échangeur thermodynamique est une pompe à chaleur air neuf / air extrait.  
[22] et [29]

La majorité des échangeurs dans les double flux de logements sont aujourd'hui des échangeurs à plaques, bien que l'échangeur thermodynamique commence à être présent dans des nouveaux équipements de certains fabricants regroupant à la fois la ventilation et la production d'eau chaude sanitaire.

Le système de la VMC double-flux limite les déperditions par renouvellement de l'air et apporte un confort thermique en hiver (arrivée d'air préchauffé). Il permet ainsi de ventiler d'avantage pour une performance énergétique améliorée (nous y reviendrons dans le chapitre suivant). Il sera d'autant plus efficace que le logement sera étanche à l'air. En effet, si les parois présentent des infiltrations, l'air neuf s'introduisant dans la paroi ne passe pas dans l'échangeur. Ce système apporte également un confort thermique en été (débit de ventilation permanent en quantité suffisante permettant d'évacuer les apports internes du logement, surtout en période nocturne). La contre-partie est la présence de deux ventilateurs et donc de deux fois plus de consommations électriques. Notons qu'aujourd'hui les fabricants proposent des ventilateurs très basse consommation.

Un autre avantage que l'on peut attribuer à la ventilation double-flux est la filtration de l'air neuf à l'entrée du logement, limitant ainsi les pénétrations de particules extérieures à l'intérieur du logement. Nous l'avons vu plus haut, ces polluants ont un effet non négligeable sur la santé. Par ailleurs, la présence d'un ventilateur au soufflage permet également de prévoir plus facilement des traitements acoustiques en luttant plus efficacement contre les pertes de charges liées à la présence de pièges à son que dans un système de ventilation simple flux.

Trois contraintes freinent aujourd'hui le développement de ce système :

- il est nécessaire de prévoir un réseau de soufflage, et donc des faux plafonds ou des soffites dans le logement,
- ce système est plus cher à l'achat qu'un système de VMC simple flux,
- ce système implique la mise en place d'une maintenance annuelle (changement des filtres, nettoyage des bouches et du réseau).

#### **4.2.5 La ventilation en fonctionnement**

Sur une durée de trois ans après l'achèvement des travaux, le code de la construction et de l'habitation permet aux agents assermentés par l'Etat de contrôler les règles de construction dans les habitations, y compris les règles d'aération des logements et le respect des débits. Seulement 350 contrôles ont lieu chaque année. Ces contrôles concernent à plus de 80% des logements sociaux. Les chiffres sont parlants : 40% des installations de ventilation ne respectent pas la réglementation (gaines non reliées au caisson ou aux bouches, le ventilateur insufflé au lieu d'extraire, ou tout simplement, absence de système de ventilation). Sur ces 40%, presque un tiers des non-conformités concernent les débits. Le tableau suivant est extrait d'une évaluation du taux de non-conformité relevé par le CETE de l'Est.



| <b>Débits d'air extraits<br/>(cas de non-conformité)</b> |                              | <b>Insuffisant</b> | <b>Excessif</b> | <b>Ensemble</b> |
|----------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| Débit<br>minimum par<br>pièce                            | Cuisine                      | 20 %               | 15 %            | 34 %            |
|                                                          | Autres pièces<br>de service  | 24 %               | 13 %            | 38 %            |
| Débit<br>maximum par<br>pièce                            | Cuisine                      | 28 %               | 13 %            | 42 %            |
|                                                          | Autres pièces<br>de services | 23 %               | 19 %            | 43 %            |
| Débit minimum du logement                                |                              | 25 %               | 17 %            | 41 %            |

FIGURE 4.10: Bilan des cas de non-conformité sur les contrôles effectués par le CETE de l'Est

Le CSTB a également relevé des dysfonctionnements sur les systèmes installés. A partir des mesures effectuées par l'OQAI lors de sa campagne de mesure en 2006, l'équipe du CSTB a ressorti les caractéristiques des systèmes de ventilation installés dans les logements en France. Le diagramme suivant présente les débits moyens mesurés aux bouches d'extraction des cuisines. Les débits présentés ne correspondent qu'aux logements où il existe un système de VMC. Ces systèmes de VMC, nous le verrons dans le paragraphe suivant, sont à 97% des systèmes de ventilation simple flux.

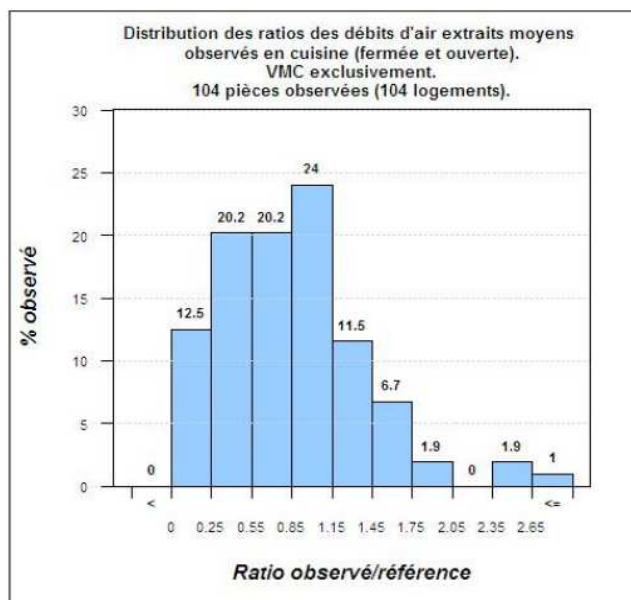


FIGURE 4.11: débits mesurés à la bouche d'extraction en cuisine lors de la campagne de mesure de l'OQAI

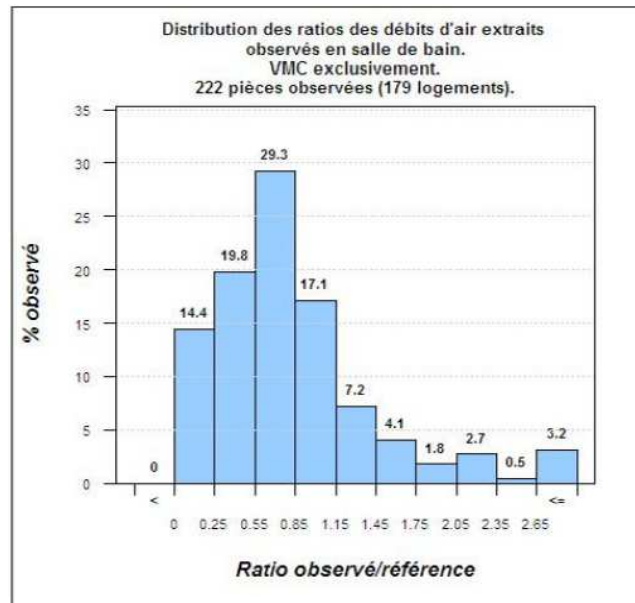


FIGURE 4.12: débits mesurés à la bouche d'extraction de la salle de bain lors de la campagne de mesure de l'OQAI

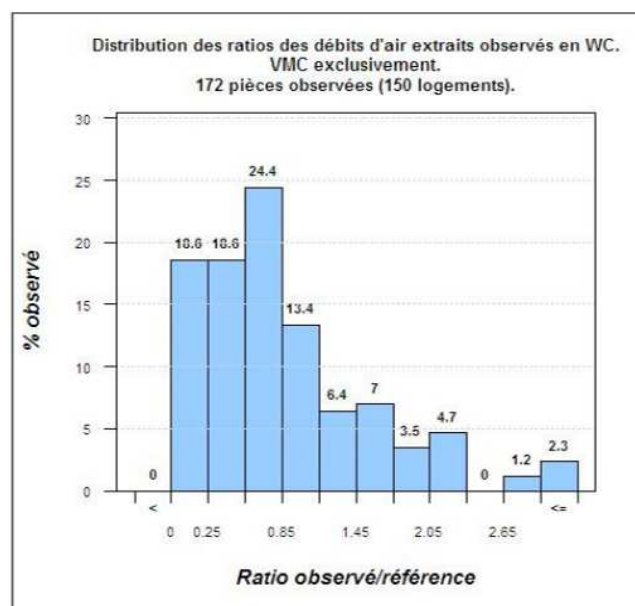


FIGURE 4.13: débits mesurés à la bouche d'extraction des WC lors de la campagne de mesure de l'OQAI

Nous pouvons constater sur ce graphique que 53% des VMC installées ne permettent pas d'atteindre les débits de référence en cuisine, 63,5% des VMC installées ne permettent pas d'atteindre les débits de référence en salle de bain et 61,6% des VMC installées ne permettent pas d'atteindre les débits de référence dans les WC. Le calcul est réalisé sur l'ensemble du logement : 56,7% des VMC installées ne permettent pas d'atteindre les débits de référence. Nous constatons que ce phénomène touche autant les logements collectifs que les maisons individuelles comme le montre le diagramme ci-dessous.

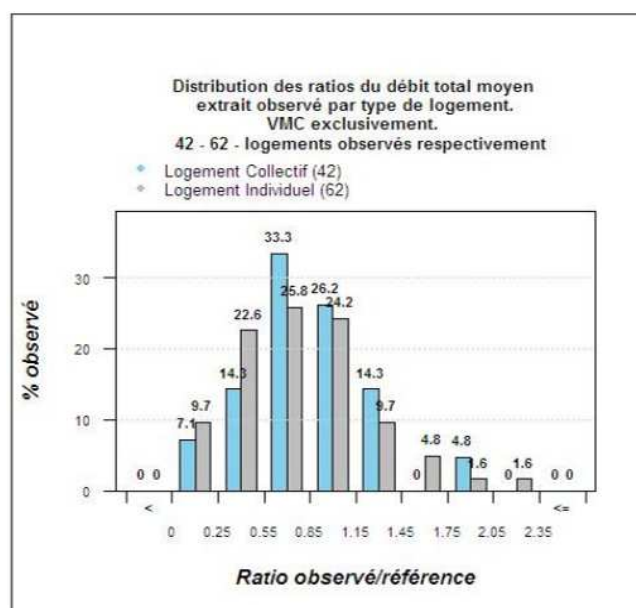


FIGURE 4.14: débits mesurés sur l'ensemble du logement lors de la campagne de mesure de l'OQAI - répartition logements collectifs / individuels

Ce problème ne s'explique pas par l'éventuel encrassement des bouches d'extraction puisque 86% d'entre elles sont en bon état. Cependant, certains systèmes ne présentent pas le bon nombre de bouches d'extraction (bouches manquantes dans une pièce de service), d'autres systèmes ont un ventilateur inadapté à la surface du logement ou disposent d'un ventilateur peu fiable.

La ventilation devrait visiblement être considérée avec plus d'attention à la conception et à l'installation. Il ne s'agit pas que de bouches d'entrée installées par le menuisier et d'un système raccordé sur le circuit électrique. La ventilation a un vrai rôle sanitaire, son intégration dans le logement devrait être appréhendé ainsi.

#### 4.2.6 Quels systèmes utilisés en France ?

Le CSTB a réalisé un rapport en juin 2009 sur l'état de la ventilation dans le parc de logements français. Ce rapport est basé sur la campagne de mesure réalisée par l'OQAI en 2006. Cette campagne a permis à l'équipe du CSTB d'estimer le pourcentage de logements équipés d'un système de ventilation et parmi ceux-là, les types de systèmes installés.

On constate la part très élevée des systèmes de ventilation simple flux parmi les VMC. Rappelons que cette enquête est tirée d'une campagne de mesure réalisée en 2006 et que depuis est intervenue la RT2005 et son label BBC qui ont fortement incité les équipes de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage à préconiser des ventilations simple flux hygroréglable. En effet, les industriels français de ventilation simple flux ont pu faire établir des avis techniques, permettant de diminuer les débits de ventilation, et ainsi de limiter les déperditions liées au renouvellement de l'air. Deux conséquences énergétiques présentent ce système intéressant pour l'obtention du label BBC : diminution des consommations de chauffage et diminution des consommations électriques des ventilateurs. Il est difficile aujourd'hui d'imaginer un bâtiment basse consommation sans ces types de ventilation dotés de ces deux avantages et d'un coût moindre que la VMC double flux. Pourtant, la ventilation double flux est tout aussi efficace pour permettre d'atteindre le label.

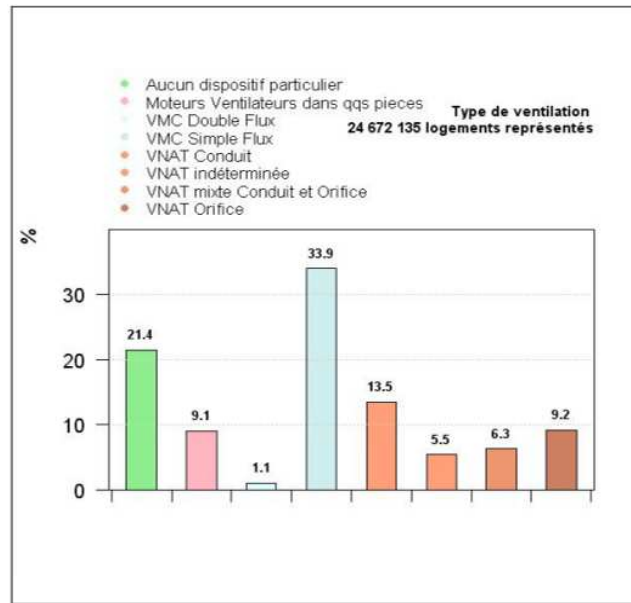


FIGURE 4.15: estimation de la répartition des systèmes de ventilation dans les logements français

Cependant, le réflexe de la VMC simple flux reste présent chez les thermiciens, les maîtres d'ouvrage, les installateurs et les constructeurs. Nous pouvons relever certaines raisons qui conduisent à ce que la VMC simple flux soit choisie devant la VMC double flux :

- La première raison évoquée est souvent le prix de l'installation. Nous aborderons cette question économique dans un prochain paragraphe. Il est vrai qu'à l'installation, la ventilation double flux est plus chère. Mais le coût d'un système doit être évalué en prenant en compte les charges annuelles de fonctionnement.
- La complexité de l'installation est également évoquée. En effet, un système double flux nécessite l'emplacement de faux plafond ainsi qu'une réflexion en amont de la conception pour disposer d'un système adapté au logement. Ceci ne représente en réalité pas un problème, c'est même plutôt une force dans le projet : l'intervention du thermicien très en amont du projet permet de faire des choix énergétiques réfléchis et de concevoir un bâtiment performant de façon simple et concertée avec le reste de l'équipe de maîtrise d'œuvre.
- La question de l'intervention sur la machine semble effrayer les bailleurs sociaux. Il est en effet indispensable d'entretenir le système (changement de filtres, entretien du réseau et des bouches), mais nous avons pu observer au travers du paragraphe précédent qu'étant donné le nombre de dysfonctionnements relevés, en réalité cette intervention devrait également avoir lieu sur les systèmes de ventilation simple flux. Par ailleurs, cette intervention est loin d'être aussi lourde et compliquée qu'elle peut l'être dans les bâtiments tertiaires.
- Enfin, bien que la question énergétique commence à peser, les températures extérieures que nous connaissons en France n'ont pas incité les constructeurs français à avancer sur les questions de récupération de chaleur et d'étanchéité à l'air avant qu'il n'y ait des contraintes réglementaires. Les fabricants de VMC double-flux, tout comme les fabricants de composants d'étanchéité à l'air sont allemands, suisses, belges, etc. Les constructeurs français ont investi dans ces gammes de produits depuis quelques années seulement. Ceci a

eu pour conséquences de limiter pendant longtemps l'accès au marché français ainsi qu'aux institutions en charge des textes et des réglementations. Par exemple, nous pouvons noter que les systèmes de ventilation double-flux collective ne disposent pas de certification leur permettant d'être intégrées comme telles dans le moteur de calcul de la réglementation thermique. Il est alors demandé aux bureaux d'études de dégrader le rendement de la centrale de 10% par rapport au chiffre avancé par le constructeur. Ceci pèse encore dans la vision que les maîtres d'ouvrage, non aguerris aux calculs réglementaires, peuvent avoir avec ces systèmes).

## 4.3 La ventilation pour limiter la pollution ?

L'un des rôles de la ventilation consiste à évacuer les polluants sans être source elle-même de pollution.

### 4.3.1 Dilution des polluants et efficacité des systèmes de ventilation

De façon simplifiée, que l'on soit face à une COV, à de la vapeur d'eau ou face à des particules, la dilution de la pollution par la ventilation agira selon le même principe. L'air neuf se charge au fur et à mesure de son passage dans le logement de pollution et est extrait du logement par le système de ventilation.

L'efficacité d'élimination des polluants est donnée ainsi :

$$E = (C_e - C_s) / (C - C_s)$$

Avec  $C_e$ , la concentration dans l'air extrait,  $C_s$ , la concentration dans l'air soufflé et  $C$ , la concentration dans le local.

On estime alors que l'efficacité est mauvaise si elle est comprise entre 0 et 1, cela signifierait que l'on retrouve moins de polluant dans l'air extrait que dans l'air du local. Le système est efficace si  $E$  est supérieure ou égale à 1.

Cette efficacité d'élimination des polluants est à distinguer de l'efficacité de la ventilation. Celle-ci correspond au rapport entre le temps de résidence minimum de l'air et le temps de résidence de l'air réel.

$$E_v = \text{Temps min} / \text{Temps réel}$$

Le temps minimum est calculé ainsi :

$$\text{Temps min} = \text{Volume de la zone} / \text{Débit d'air neuf} = 1 / \text{Taux de renouvellement}$$

et le temps réel correspond au double de l'âge moyen de l'air dans le local, obtenu à partir de mesure de concentrations réelles dans le local.

### 4.3.2 Pollution à l'entrée du logement

Nous avons vu précédemment que les occupants de bâtiments situés à proximité d'un trafic routier ont des risques de maladies respiratoires très élevés. Particulièrement dans ce cas, la ventilation peut donc présenter un risque de transfert des polluants depuis l'extérieur vers l'intérieur. Slezakova nous explique dans son article ([27]) que ce sont les particules fines qui pénètrent le plus dans les logements et que les PM10 en provenance de l'extérieur constituent 10 à 40 % des particules retrouvées à l'intérieur, ce pourcentage s'élève à une fourchette allant de 35 à 92 % pour les particules inférieures à  $2\text{ }\mu\text{m}$ . La filtration particulaire sur les entrées peut permettre de limiter cette pénétration de polluants extérieurs dans le logement. Les petites grilles que l'on peut retrouver sur les bouches d'entrée d'air de système simple flux sont beaucoup trop grossières pour éviter ce phénomène. En revanche, des filtres sont installés sur la prise d'air neuf des systèmes de ventilation double flux. Ces filtres sont généralement de classe F7. Les filtres F7 sont des filtres fins ayant une haute efficacité : entre 80 et 90% pour les particules de  $0,4\text{ }\mu\text{m}$ .



FIGURE 4.16: exemple d'un filtre F7

### 4.3.3 Pollution dans le système de ventilation

Le flux d'air qui passe au travers des composants de ventilation peut se charger en polluant selon la composition de ces éléments. Des travaux ont déjà été menés sur certains éléments. Par exemple, une étude a été réalisée sur la question des filtres en 2011 par l'association Uniclimate. L'objectif : vérifier que les filtres, composés en fibres, ne diffusent pas ces fibres à travers l'air entrant. Un filtre F7 est composé ainsi :

- Le cadre est en ABS, c'est-à-dire en acrylonitrile butadiène styrène. L'acrylonitrile est classé C2. Cependant, le flux est essentiellement concentré au niveau du filtre, et non au niveau du cadre.
- les filtres sont en fibres de verre. Des mesures en laboratoire ont été effectuées selon la méthode ISO 8672. Le résultat de ces mesures indique que le filtre ne relargue pas de fibre dans l'air entrant.

Cet aspect, plutôt rassurant, n'exclue pas qu'un filtre puisse être amené à dégrader la qualité de l'air intérieur. Le filtre a pour rôle de capter les particules à l'entrée du logement. Ces particules peuvent être chargées en COV. Au contact de ces particules, l'air neuf peut lui-même se charger en COV. Le problème va même un peu plus loin. Suzanne Déoux, dans son livre « Bâtir pour la santé des enfants », indique que « les composés organiques associés aux particules réagissent avec l'ozone provenant de l'air extérieur et produisent des substances suffisamment volatiles pour diminuer la qualité de l'air perçue. Les concentrations en formaldéhyde ont été, par exemple, mesurées avant et après passage de l'air à travers des filtres de différentes efficacités (de F5 à F8) installés depuis environ un an dans neuf immeubles finlandais de bureaux. En présence d'ozone, les teneurs en formaldéhyde de l'air ont augmenté de 50% après le filtre ».

La maintenance du système et particulièrement le changement très régulier des filtres (c'est-à-dire au moins une fois par an) est donc indispensable pour assurer l'efficacité et le rôle des filtres qui est de limiter la pénétration des pollutions à l'intérieur du logement.

Les pièges à son sont également constitués de fibres. Ils n'ont pas fait l'objet de mesure lors de l'étude menées par l'association Uniclimate. Par principe de précaution, il peut être imaginé de les protéger du contact direct de l'air.

Les conduits de ventilation doivent être choisis de façon à limiter tout impact sur la qualité de l'air neuf. Les matières plastiques (conduits souples) émettent des COV, les conduits métalliques peuvent contenir des résidus d'usinage, certains conduits sont enduits d'une huile qui aura tendance à faire agglomérer la poussière, les conduits en fibre de verre peuvent s'avérer dangereux si le nettoyage de la gaine est fait avec les mauvais outils (grattage métallique). Sur le chantier, l'intérieur des conduits ne doivent pas rester à l'air libre afin d'éviter tout dépôt de poussières.

Au-delà de la matière qu'il convient de sélectionner en fonction des critères de qualité de l'air, l'attention doit être portée sur la facilité d'entretien du réseau. Celui-ci doit être accessible en tout point, par ailleurs, il ne doit présenter aucun risque de condensation afin de limiter la prolifération de micro-organismes. L'équipe de conception et l'installateur ont encore là un rôle important à jouer pour que le fonctionnement du système soit efficace énergétiquement et sanitaire.

## 4.4 Comparaison de systèmes de ventilation

### 4.4.1 Les débits de ventilation

Le principe d'un système de ventilation est avant tout d'apporter un débit d'air hygiénique suffisant. Une ventilation insuffisante est source de développement d'humidité, de concentrations en polluants (COV, CO<sub>2</sub>, etc.). Cependant depuis les deux chocs pétroliers, la priorité est à la diminution des taux de ventilation pour limiter les déperditions de chaleur par le renouvellement d'air. Selon Dimitroulopoulou [11], la diminution des taux de ventilation coïncide avec l'augmentation des maladies liées aux allergies et l'augmentation de l'asthme. Dans son article, une analyse des différentes études épidémiologiques lui permet de conclure que parmi les facteurs liés au logement et influençant l'asthme chez les enfants, les plus marquants sont la fumée de tabac, les pollutions du trafic routier qui pénètrent dans le logement et l'humidité avec le développement de moisissures. Il implique directement une relation entre l'élimination des sources de pollutions et la mise en place d'un taux de renouvellement d'air maintenu et suffisant pour le confort et la santé quotidienne.

Dimitroulopoulou précise que peu d'informations sont disponibles sur la ventilation dans les logements et la santé. Seules quelques études concluantes ont été trouvées. Dans son article, il nous fait part des résultats principaux qu'il a pu relever :

- Le taux de 0,5 vol/h est souvent le seuil en-dessous duquel on peut faire un lien entre la ventilation et des éléments tels que l'inconfort, l'impact sur la santé et la baisse de la productivité. Cela ne signifie pas cependant que cette valeur doit être prise comme le seuil minimum de ventilation au regard du critère de la santé. Des recherches en cours doivent permettre d'établir des lignes directrices en terme de ventilation et de santé.
- L'analyse est rendue complexe par le fait que l'on traite de maladies respiratoires pour lesquels les diagnostics ne sont pas harmonisés en Europe et difficiles à réaliser en une seule fois sur des échantillons.
- Dans certains pays nordiques, une association indirecte a été trouvée entre le taux de ventilation et l'asthme et les allergies chez les enfants. Cette étude met en avant l'impact du système constructif et de l'humidité intérieure sur les maladies respiratoires chez les enfants. Cependant, la question du système constructif fait débat pour certains équipements du bâtiment. On peut citer notamment les discussions autour du rôle des phtalates présent dans les matériaux en PVC sur les maladies respiratoires.
- Des études épidémiologiques ont montré que les habitants de logements humides avaient des risques supplémentaires de développer des maladies respiratoires, des infections respiratoires et une exacerbation de l'asthme.
- Un rapport de EUROVEN conclue que dans les climats nordiques, un taux de ventilation de 0,5 vol/h permet de limiter le développement de l'humidité. Des résultats obtenus de modèles théoriques au Royaume Uni suggèrent également un taux de 0,5 vol/h pour éviter le développement de l'humidité et indiquent qu'un taux significativement plus élevé (0,8 vol/h) permet de contrôler le développement des acariens, sachant qu'un lien a été établi entre la présence d'acariens et les risques de sensibilisation aux allergies.
- La ventilation peut malgré tout s'avérer plus nocives dans les lieux où la pollution extérieure est supérieure à la pollution intérieure et où il n'y a pas de système de filtrations à l'entrée du logement. Dans les cas où les logements sont situés près de trafics routiers, la ventilation a un impact sur les risques d'asthme et de rhinite.

Le tableau suivant présente un état des lieux de quelques réglementations européennes concernant les débits de ventilation. Notons que certains de ces débits sont modulés, par exemple en Allemagne la perméabilité à l'air et l'occupation du logement sont prise en compte pour calculer les débits de ventilation. Par ailleurs, les débits présentés pour la France sont liés à l'arrêté de 1982 mais ne reprennent pas les débits restreints accordés dans le cadre des avis techniques évoqués plus haut.



| Pays               | Réglementation                          | Débit global                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| République Tchèque | CSN 73 4301 <u>Résidential Building</u> | 0,5 vol/h                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Danemark           | DS 418 2002                             | 0,5 vol/h                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <u>Finlande</u>    | NBC-D2                                  | > 0,4 vol/h                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Allemagne          | DIN 1946 Part 6, DIN 18017 VDI 2088     | si $< 50 \text{ m}^2 \rightarrow 60 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit $> 0,5 \text{ vol/h}$ )<br>si $50 \text{ à } 80 \text{ m}^2 \rightarrow 120 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit de 0,6 à 1 vol/h)<br>si $> 80 \text{ m}^2$ (T5 et +) $\rightarrow 180 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit $< 0,9 \text{ vol/h}$ )                                                                 |
| Norvège            | Code de la construction                 | > 0,5 vol/h                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Suède              | BBR94                                   | > 0,5 vol/h                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Suisse             | SIA 1801998 et SIA 382 1992             | 12 à 30 $\text{m}^3/\text{h}$ par personne en occupation et $> 0,3 \text{ vol/h}$ en inoccupation                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| France             | Décret mars 1982                        | T1, $> 35 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit $\approx 0,5 \text{ vol/h}$ )<br>T2, $> 60 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit $\approx 0,5 \text{ vol/h}$ )<br>T3, $> 75 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit $\approx 0,5 \text{ vol/h}$ )<br>T4, $> 90 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit $\approx 0,45 \text{ vol/h}$ )<br>T5, $> 105 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit $\approx 0,4 \text{ vol/h}$ ) |

FIGURE 4.17: les débits de ventilation dans quelques pays européens

Nous constatons que les réglementations constituent plutôt la borne inférieure des débits souhaités par les médecins et épidémiologistes travaillant sur les études citées. Il apparaît alors risqué d'un point de vue sanitaire de pouvoir diminuer ces débits.

Nous pouvons qualifier la qualité de l'air de la réglementation française en fonction de la norme NF EN 13779 que nous avons évoqué plus haut sur le  $\text{CO}_2$ .

Ce croisement entre la réglementation française et ce que préconise l'Europe sur la qualité de l'air intérieur au travers de la norme NF EN 13779 établit que les débits demandés dans la réglementation française correspondent effectivement à la borne inférieure de ce qu'il faudrait faire, voire se situent en dessous de cette borne. Une réévaluation de ces débits pourrait-elle améliorer les résultats sanitaires observés aujourd'hui ? Et surtout, les systèmes de ventilation en France nous permettent-ils réellement d'atteindre au moins cette borne inférieure ? C'est ce que nous étudierons dans la suite de ce rapport.

|                                                     | Nombre de pièces principales<br>(pris comme équivalent au nombre de personne dans le logement) |         |         |         |                    |          |          |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|--------------------|----------|----------|
|                                                     | 1                                                                                              | 2       | 3       | 4       | 5                  | 6        | 7        |
| Débit total minimal du logement (m <sup>3</sup> /h) | 35                                                                                             | 60      | 75      | 90      | 105                | 120      | 135      |
| Débit minimal par personne (m <sup>3</sup> /h)      | 35                                                                                             | 30      | 25      | 23      | 21                 | 20       | 20       |
| QAI selon la norme NF EN 13779                      | moyenne à modérée                                                                              | modérée | modérée | modérée | modérée à médiocre | médiocre | médiocre |

FIGURE 4.18: la qualité de l'air selon la norme NF EN 13779 et la réglementation de la ventilation en France

#### 4.4.2 La modulation des débits

Dans son article Laverge [19] travaille sur les choix de la régulation et l'impact sur la qualité de l'air. Il modélise une maison sur le logiciel CONTAM. Une famille de 4 occupants réside dans cette maison. Le taux d'infiltration par l'enveloppe a été modélisé à 3 vol/h sous 50 Pa, ce qui équivaut à environ 0,8 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup> sous 4 Pa (valeur Q4), soit la valeur de référence d'une maison respectant la RT2005. La maison modélisée est un T5, représenté ci-après :

Il compare quatre systèmes de régulation d'une VMC simple flux :

- Le premier système est lié à l'humidité relative et joue sur la variation du débit d'extraction avec un débit minimum égal à 10% du débit conventionnel lorsque l'humidité relative est inférieure à 65% et un débit maximal lorsque l'humidité relative est supérieure à 70%.
- Le second système est basé sur une détection de présence et agit sur la vitesse du ventilateur avec une vitesse redescendant à 10% de la valeur conventionnelle après 10 minutes d'absence dans les pièces humides.
- Le troisième système mesure les concentrations de CO<sub>2</sub> et permet une ouverture maximale des entrées d'air si la concentration en CO<sub>2</sub> dépassent les 1000 ppm dans la pièce où se situe l'ouverture et restent à 10% de son ouverture maximale le reste du temps.
- Le quatrième système est une combinaison des trois premiers systèmes de régulation et agit sur les trois mêmes composants de l'équipement de ventilation.

Notons que les débits d'extraction sont proches de ceux que l'on obtiendrait avec une ventilation hygro B (27 m<sup>3</sup>/h en débit réduit, 165 m<sup>3</sup>/h sur la plage maximale d'humidité). Mais les taux d'humidité régulant l'ouverture des bouches d'extraction sont très éloignés : dans le cas de l'article, le débit réduit est proposé alors qu'une humidité relative forte est toujours présente (65%). Cependant, la régulation sur le CO<sub>2</sub> présente le même défaut, c'est-à-dire que le taux de concentration qui permet de redescendre en plage de débit réduit est assez élevé (1000

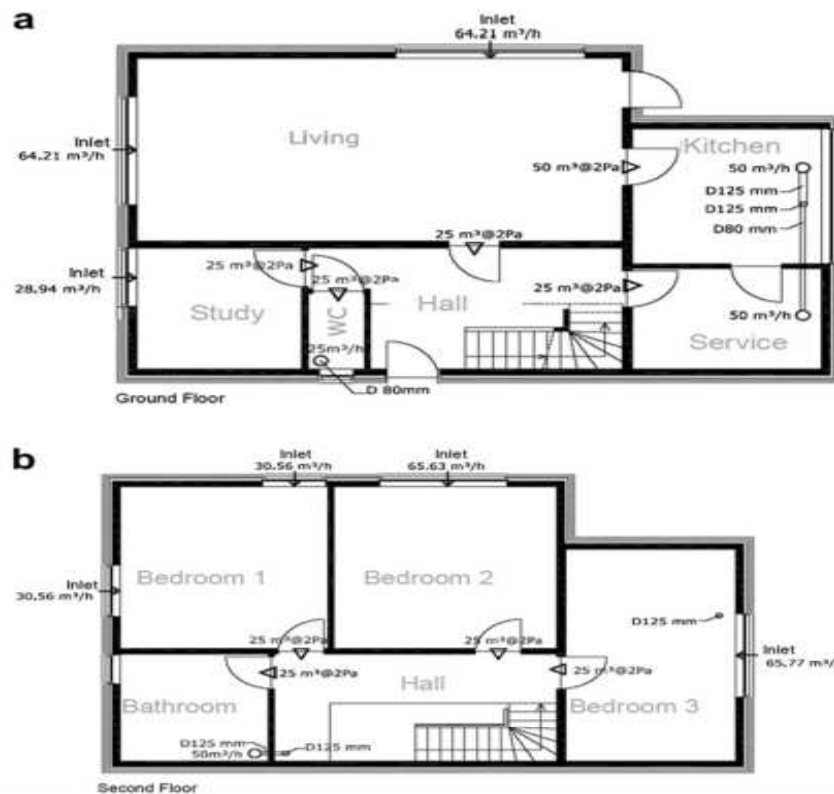


FIGURE 4.19: modélisation de la maison de l'article Laverge et al.

ppm, correspondant à la valeur limite recommandée par l'OMS). Notons également que les valeurs obtenues d'excès en  $\text{CO}_2$  sont assez basses par rapport aux faibles débits précédemment évoqués. Mais les mêmes contraintes étant posées sur chacun des systèmes de régulation, cet article apporte l'intérêt d'une première approche pour une comparaison entre différents mode de régulation d'une simple flux.

Plus d'une centaine de simulation ont été effectuées pour chaque stratégie de régulation pendant la période de chauffe. Les courbes évaluant la qualité de l'air permettent de constater que la régulation basée sur la détection d'humidité a globalement un impact négatif sur la qualité de l'air.

Observons la courbe présentant l'excès moyen de concentration de  $\text{CO}_2$  par rapport à la concentration de  $\text{CO}_2$  extérieure. Dans le cas de la régulation basée sur l'humidité relative, la distribution des valeurs présente une valeur médiane de 370 ppm (il y a 50% de chance d'être plus grand ou plus petit que cette valeur), alors qu'elle n'est que de 300 ppm pour une régulation sur le  $\text{CO}_2$ . Le quatrième système de régulation est le plus mauvais système du point de vue de la qualité de l'air, la distribution a une valeur médiane égale à 480ppm. Lorsqu'aucun système de régulation n'intervient sur les débits, la valeur médiane redescend à 270 ppm. Ces données sont basées sur une moyenne des valeurs journalières. Notons que la prise en compte d'une valeur moyenne peut cacher l'impact de certains pics de concentration à certains heures de la journée.

Observons la courbe présentant les niveaux de pollutions liées à l'émission d'un gaz traceur.

**Table 1**

Floor area ( $\text{m}^2$ ) and design supply/extraction airflow rate ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) of the spaces in the building model.

| Ground floor | Area | Supply | Exhaust |
|--------------|------|--------|---------|
| Living room  | 35.7 | 128.4  |         |
| Office       | 8    | 28.9   |         |
| Kitchen      | 10.2 |        | 50      |
| Service room | 7.7  |        | 50      |
| Toilet       | 1.7  |        | 25      |
| Hallway      | 28.1 |        |         |
| 1st floor    |      |        |         |
| Bedroom 1    | 17   | 61.1   |         |
| Bedroom 2    | 18.2 | 65.6   |         |
| Bedroom 3    | 18.3 | 65.8   |         |
| Bathroom     | 8    |        | 50      |
| Hallway      | 28.1 |        |         |

FIGURE 4.20: débits d'air pris en compte dans la modélisation

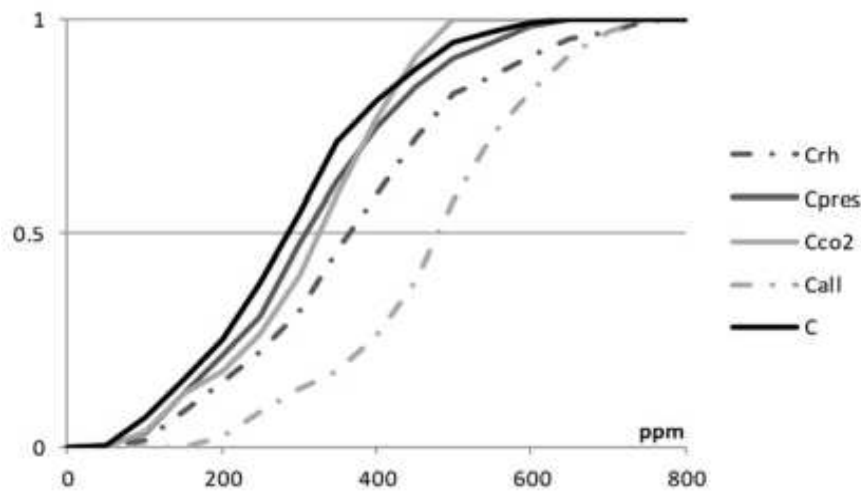


FIGURE 4.21: excès de concentration intérieure en  $\text{CO}_2$  par rapport à l'extérieur en fonction du système de régulation

Ce gaz traceur est activé dès qu'un occupant utilise la salle de bain ou les toilettes. Le gaz traceur est émis pendant 5 minutes. Il a pour rôle d'étudier l'efficacité des systèmes de ventilation face aux pollutions spécifiques dégagées dans ces locaux. On constate sur le graphique que le système de ventilation basée sur l'humidité est également le moins efficace pour l'évacuation de ce type de polluant.

Cette étude nous permet de constater que la régulation sur l'humidité n'est pas un bon traceur de l'activité humaine par rapport au  $\text{CO}_2$ , nous y reviendrons dans le paragraphe suivant. De plus, Laverge & al. précise que les émissions de polluants liées aux matériaux présents dans le bâtiment ne sont pas intégrées dans son modèle de calcul. Il traite uniquement les sources

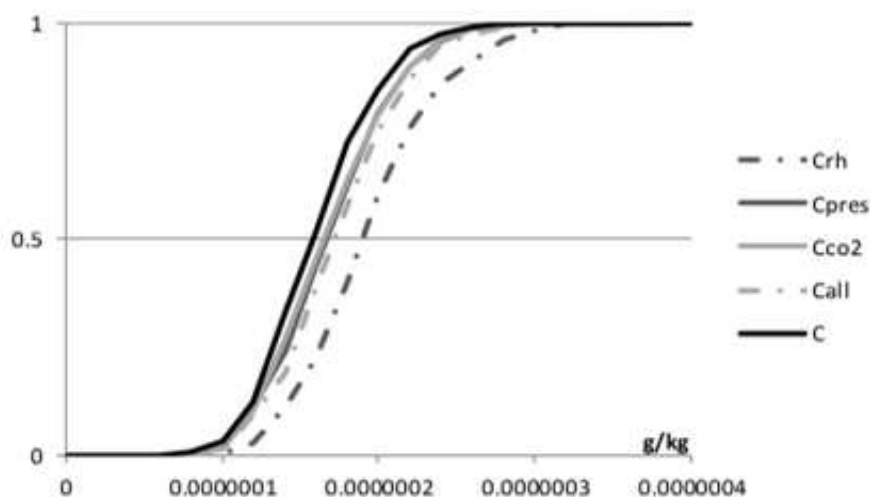


FIGURE 4.22: concentration d'un gaz traceur émis dans les simulations (en kg/kg d'air sec)

de pollutions liées à l'usage du bâtiment. Or certains polluants présents dans le logement sont émis en continu et ne dépendent pas de l'activité humaine. La régulation sur l'humidité semble encore moins pertinente (rappelons que le système qui se répand le plus dans les logements basse consommation actuellement en France est régulée précisément sur l'humidité). Cet article ne permet pas d'évaluer les impacts sanitaires de ce mode de régulation, mais laisse envisager que le choix fait dans la régulation de la ventilation n'est pas anodin sur la qualité de l'air intérieur.

#### 4.4.3 Le système de ventilation

##### Mesures dans une maison automatisée

Il est encore difficile de trouver de la littérature sur ce sujet, mais quelques sujets de recherche se consacrent à la question et nous permettent d'avoir à disposition des outils de réflexion. La thèse écrite par Juslin Koffi [18] en 2005 « Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles » compare trois systèmes de ventilation selon différents critères, dont la qualité de l'air qui fait l'objet de recherches expérimentales et d'une analyse numérique. Dans un premier temps, l'auteur fait une série de comparaison en grandeur nature dans une maison équipée de différents systèmes de ventilation (ventilation simple flux, ventilation double flux, ventilation naturelle), d'émetteurs de polluants et de différents capteurs. Il s'agit de la maison MARIA (Maison Automatisée pour les Recherches Innovantes sur l'Air), maison type F5, située à Champs sur Marne et appartenant au CSTB.

En plus de l'émission de polluants et de la période de chauffe, il est possible de programmer différents paramètres d'occupation (fermeture et ouverture des portes intérieures et des fenêtres, production d'ECS, utilisation d'appareils ménagers, etc.). La perméabilité à l'air a été évaluée au travers de mesure (blower door) et est équivalente à  $0,9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  sous 4 Pa. Cette valeur est légèrement supérieure à la valeur exigée pour le label BBC Effinergie dans la RT2005 et pour le niveau standard dans la RT2012 (valeur fixée à  $0,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  sous 4 Pa). Le gaz traceur utilisé dans ces expériences est de l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ), gaz absent de l'air ambiant, donc

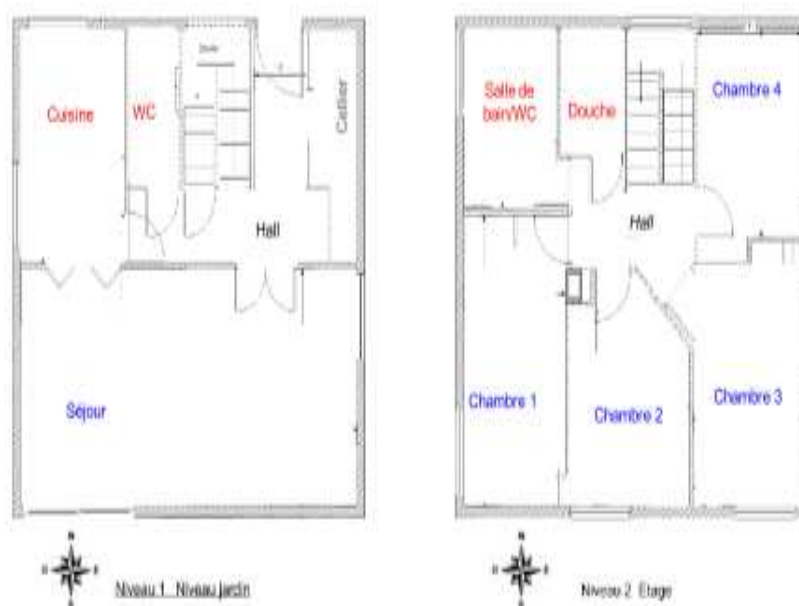


FIGURE 4.23: configuration de la maison MARIA

facilement détectable. Deux méthodes conjointes sont utilisées pour évaluer l'évacuation du polluant. Le gaz est d'abord injecté selon un taux constant dans la pièce pendant 5 heures (méthode d'injection constante) puis une phase de décroissance est analysée (méthode de décroissance).

L'émission de polluant est réalisée depuis différents endroits pour représenter différents types de pollution. L'émission dans le salon ou les chambres permet de se rapprocher d'une émission ponctuelle liée à l'activité humaine ( $\text{CO}_2$ ...), l'émission dans la cuisine permet de représenter les COV et émissions d'humidité liés à la cuisson des aliments, l'émission dans le garage représente des émanations de radon ou de COV d'hydrocarbures issus du garage.

Par ailleurs, l'auteur a souhaité évaluer l'impact des conditions intérieures et extérieures sur l'évacuation des polluants et selon les modes de ventilation : le tirage thermique (production de chaleur via le système de chauffage), l'effet du vent (une mesure du vent a été prise pendant l'expérience), les pertes de charges entre les pièces (portes intérieures fermées ou ouvertes). Lors de ces expériences, le gaz traceur est émis pendant 5 heures puis une phase de décroissance est observée.

D'après les courbes obtenues, nous pouvons constater que :

- Dans le cas « simple flux - portes fermées - sans chauffage », la pollution est extraite principalement dans la cuisine. Ce qui est extrait dans les autres pièces de service se fait proportionnellement aux débits extraits. Notons cependant que les polluants se diffusent

dans la chambre. Or, selon l'arrêté de 1982, le balayage doit se faire depuis les pièces sèches vers les pièces humides, sans polluer les autres pièces sèches. Nous observons que ce n'est pas le cas ici. L'auteur explique ce phénomène notamment par les pressions exercées par le vent sur les parois. La mesure du vent effectuée durant l'expérience lui permet de mettre en lien l'évolution des polluants dans les pièces et les changements de direction du vent. Le système de simple flux est donc ici très sensible à ces phénomènes.

- Dans le cas « simple flux - portes fermées - avec chauffage », le polluant est présent en plus grande quantité dans le salon, il est moins rapidement évacué. Ceci est observé également pour les chambres. Le système de simple flux semble donc également sensible aux différences de température entre les pièces et aux phénomènes de tirage thermique (température plus élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur).
- Dans le cas « simple flux - portes ouvertes - avec chauffage », le principe du balayage est totalement perturbé, les autres pièces de vie ont des concentrations de polluant assez élevées.

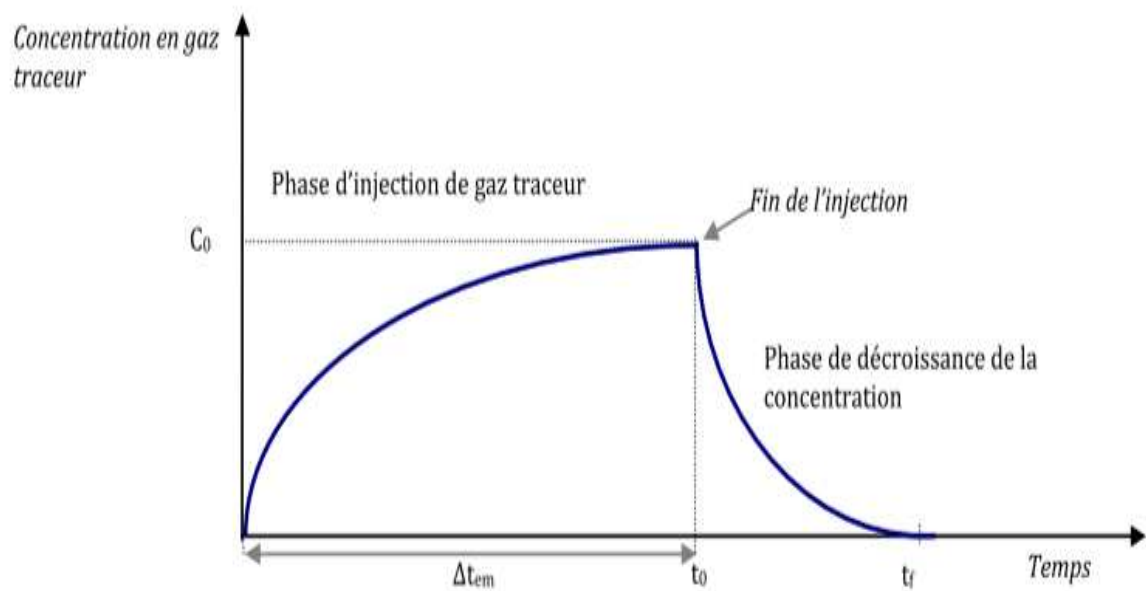


FIGURE 4.24: Utilisation d'un gaz traceur pour évaluer les systèmes de ventilation



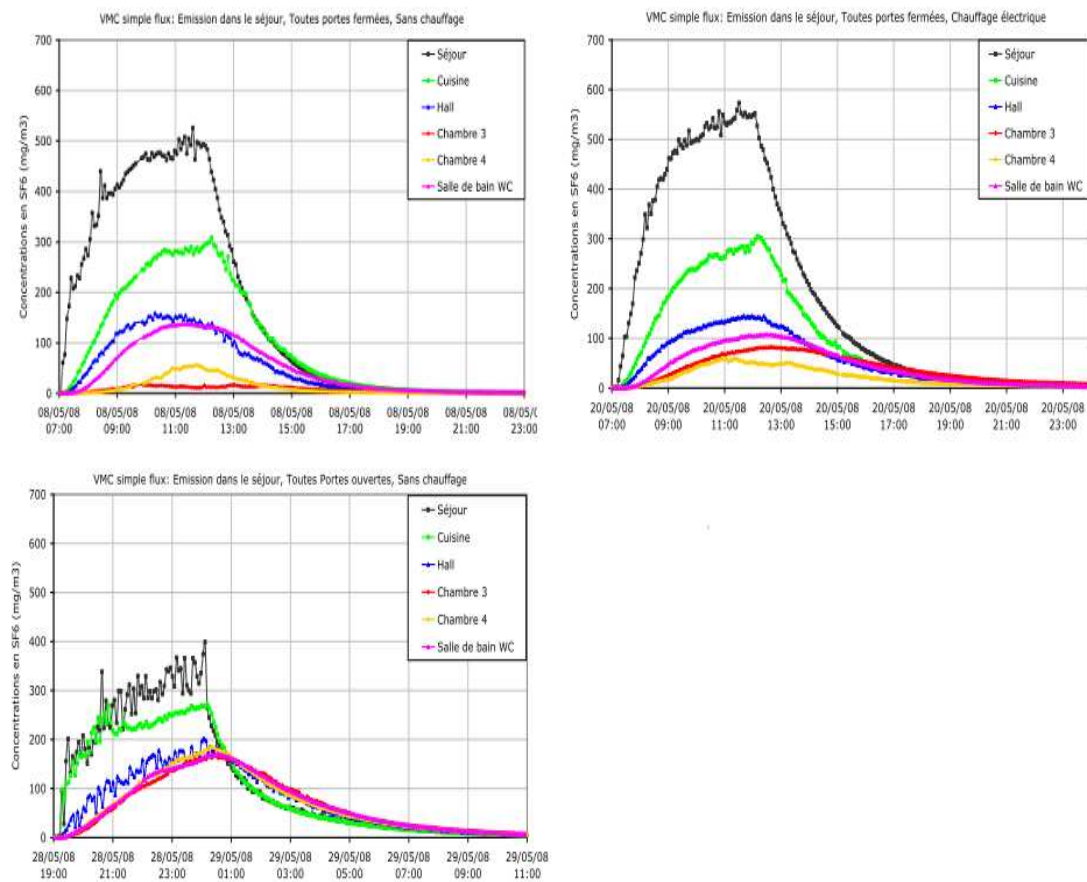


FIGURE 4.25: Emission d'un polluant dans le séjour - ventilation simple flux

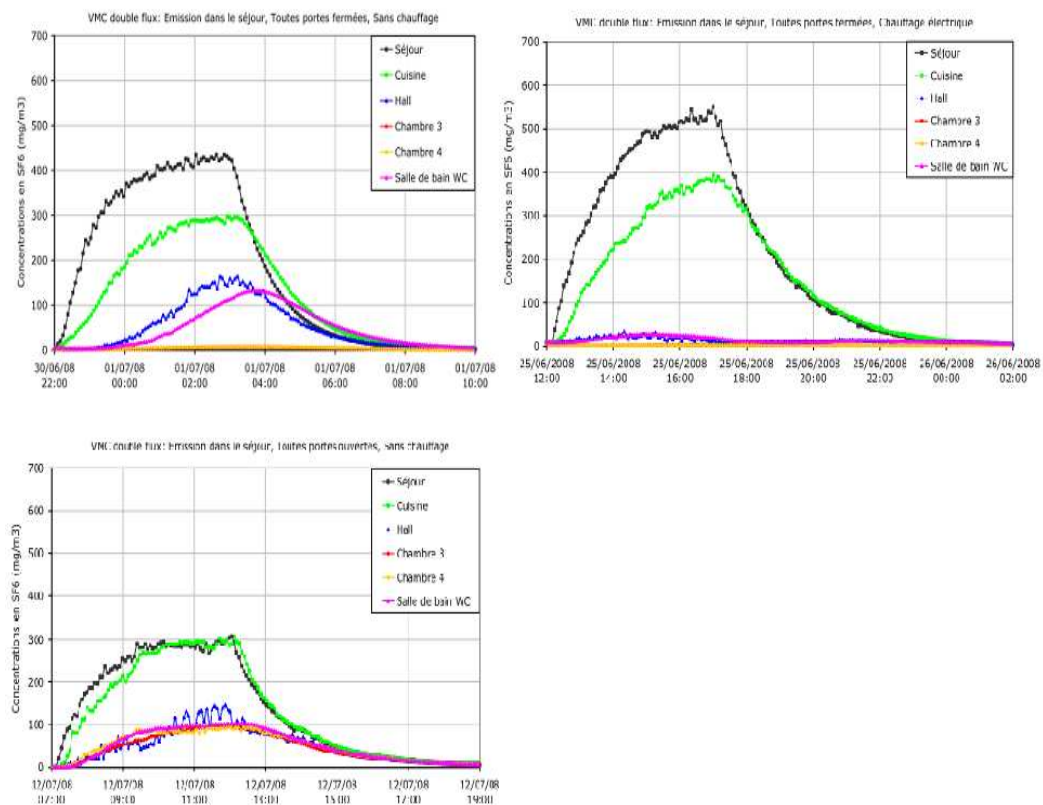


FIGURE 4.26: Emission d'un polluant dans le séjour - ventilation double flux

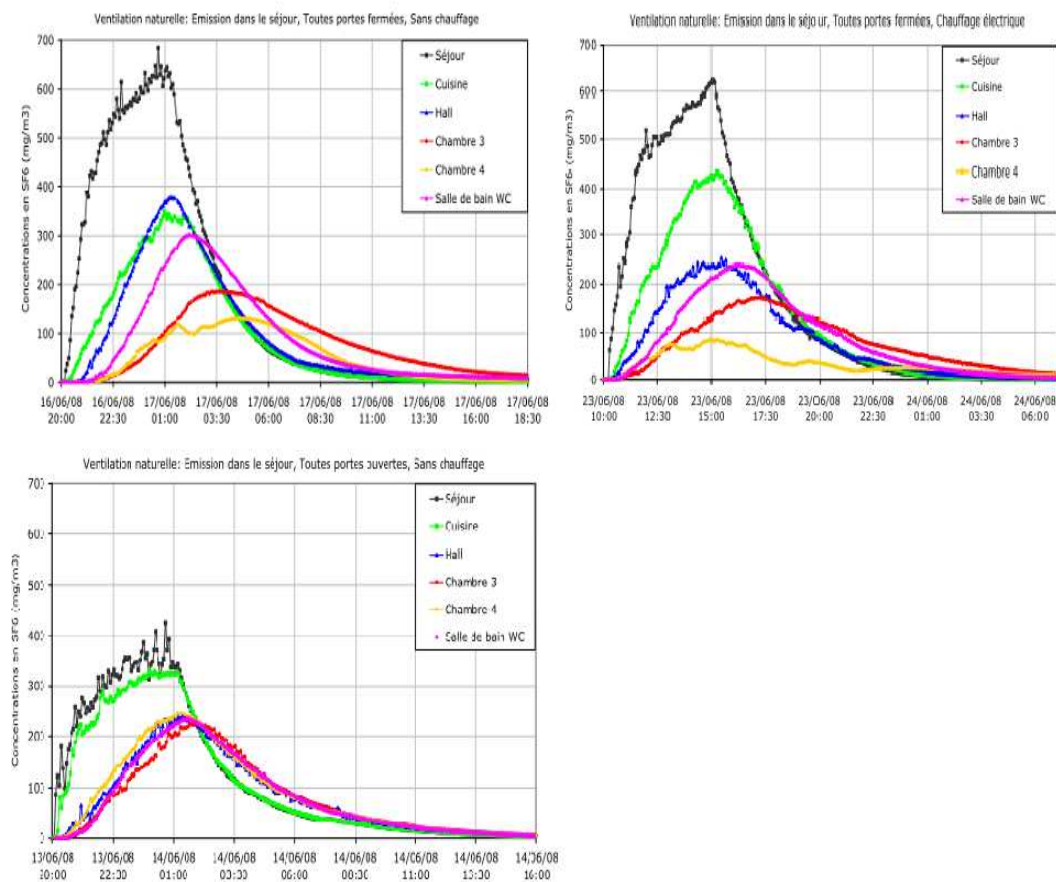


FIGURE 4.27: Emission d'un polluant dans le séjour - ventilation naturelle

L'auteur précise que le renouvellement d'air dans une pièce se trouvant dans des conditions favorable (sans chauffage et la façade principale face au vent) peut être multiplié par 1,5 par rapport à une situation moins favorable.

Les courbes de la ventilation double flux dans le cas du même polluant nous permettent de constater que :

- Dans le cas « double flux - portes fermées - sans chauffage », on ne retrouve pas de trace du polluant dans les autres pièces de vie. Le principe du balayage est respecté et le polluant reste concentré autour du lieu d'émission. Par ailleurs, la pollution dans le salon est mieux évacuée :  $100\text{mg}/\text{m}^3$  en moins dans le salon et de manière générale, sur l'ensemble des pièces, pollution beaucoup moins forte. L'auteur relève malgré tout une sensibilité

du système aux pressions du vent sur les parois, mais le principe d'insufflation limite la pénétration de l'air pollué dans les autres pièces de vie.

- Dans le cas « double flux - portes fermées - avec chauffage », tout comme avec la simple flux, le polluant stagne un peu plus dans le salon (dans une proportion moindre qu'avec la simple flux). Son évacuation s'effectue toujours principalement par la cuisine et les autres pièces de vie ne sont pratiquement pas polluées.
- Dans le cas « double flux - portes ouvertes - sans chauffage », le polluant se répartit plus facilement dans la maison. Cependant, les chambres ont une concentration toujours moins élevée que dans le cas de la simple flux (grâce au principe d'insufflation) et le niveau global de pollution dans la maison est toujours moindre.

Avec la ventilation naturelle :

- Le balayage n'est clairement pas respecté. Par ailleurs le niveau de pollution est supérieur aux deux autres systèmes. Nous pouvons relever un fort niveau de pollution dans la salle de bain ainsi que dans les chambres, même après la diminution de la pollution dans le séjour.
- Dans le cas « ventilation naturelle - portes fermées - avec chauffage », nous constatons que le système est sensible au tirage thermique, ainsi qu'à la pression du vent sur les parois (ce qui paraît logique, puisque ce sont précisément les deux moteurs de la ventilation naturelle).

Apportons un complément à ce niveau de l'analyse concernant la ventilation naturelle. La disposition des équipements est plus proche des systèmes de ventilation naturelle mis en oeuvre après l'arrêté de 1982 que de la conception actuelle de ces systèmes. Le système semble peu optimisé. Ci-après sont pris en photo les systèmes d'entrée d'air et l'extracteur statique de la maison MARIA.



FIGURE 4.28: Entrées d'air et extracteur statique pour la ventilation naturelle sur la maison MARIA

Ci-après, quelques exemples de conception d'extracteurs statiques (utilisation du vent au travers d'extracteurs spécialement étudiés - utilisation de l'énergie solaire pour optimiser le tirage thermique dans une cheminée solaire).



FIGURE 4.29: Extracteurs de ventilation naturelle

Les analyses qui suivent tiendront toujours compte des résultats de la ventilation naturelle, néanmoins, ils ne pourront pas valoir pour une généralité sur ce système de ventilation.

Les résultats sont issus de l'analyse des cas de l'émission de polluant dans la cuisine, dans l'une des chambres et enfin dans le garage. La ventilation simple flux et la ventilation double flux, dans le cas de l'émission située dans la cuisine permettent d'évacuer facilement le polluant dans cette pièce. Dans le cas des portes ouvertes, le système de ventilation simple flux ne permet pas de limiter la diffusion du polluant à la cuisine, le séjour qui se trouve à proximité, mais également les chambres sont concernées de façon non négligeable par la pollution. En revanche, le système de double-flux limite très fortement la diffusion du polluant dans les pièces à vivre autre que le séjour, où l'on retrouve une trace de ce polluant. Dans le cas de la ventilation

naturelle, les valeurs de pollution sont très fortes, y compris dans les pièces à vivre. Une relation est à nouveau faite avec les changements de direction du vent dans le cas de ce système.

Lorsque le polluant est émis dans la chambre, nous constatons à nouveau la sensibilité du système de ventilation simple flux par rapport au tirage thermique et aux effets du vent sur les parois. Le polluant est très mal évacué et est dispersé fortement dans la chambre voisine, même avec les portes fermées. Le bas de la maison est en revanche moins touché. Le système de double flux permet d'évacuer plus vite le polluant et de limiter largement la pollution de la chambre voisine en comparaison avec le système de simple flux. Par ailleurs, dans ce dernier cas, le rez-de-chaussée n'est pas touché.

Le cas du garage est intéressant pour la ventilation double flux. En effet, pour ce système, le reste des pièces étant en parfaite équilibre (insufflation = extraction), le polluant n'a pas tendance à se disperser dans la maison. Il passe au travers de la colonne de ventilation pour s'extraire directement à l'extérieur de la maison. Pour le système de ventilation simple flux, le polluant est légèrement présent dans les pièces à vivre (suffisamment pour être relevé) et assez présent dans les pièces humides, dans lesquelles il est extrait.

Cette expérimentation très intéressante nous permet de constater que quelque soit le système de ventilation utilisé, le principe du balayage des pièces sèches vers les pièces humides n'est jamais respecté lorsque les portes de la maison sont ouvertes. Les autres pièces à vivre sont touchées par la pollution. Mais parmi les trois systèmes, la ventilation double flux permet systématiquement de limiter cette diffusion de la pollution à travers l'ensemble des pièces et amène également à une pollution moins élevée sur l'ensemble des pièces de la maison. Ce système semble être le moins sensible aux conditions intérieures et extérieures, les effets du vent sur les parois et le tirage thermique viennent le perturber mais dans une moindre mesure que pour les deux autres systèmes. L'avantage de ce lourd travail mené par l'auteur est d'obtenir des situations réelles de conditions extérieures (infiltrations et exfiltrations non réparties uniformément sur les façades et effets du vent non homogène sur les parois). Mais il en résulte aussi des difficultés de comparaison à conditions extérieures égales. Par ailleurs, la ventilation double flux est dans ce cas une ventilation autoréglable qui fonctionne avec des débits d'extraction équivalents à ceux de la double flux. Notre question de la régulation posée au paragraphe précédent n'est donc pas prise en compte. L'auteur propose de modéliser la maison MARIA, nous pourrions ainsi analyser ses résultats de comparaison de l'ensemble des systèmes à conditions extérieures égales.

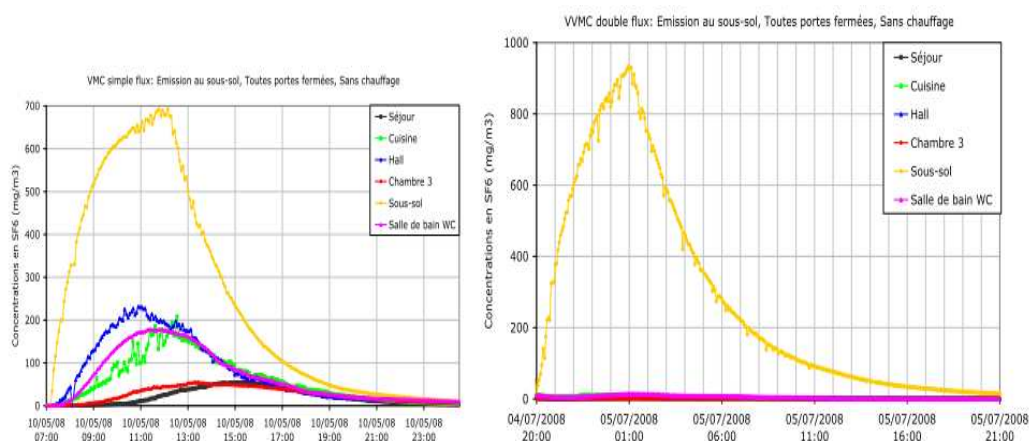


FIGURE 4.30: Emission d'un polluant dans le garage - ventilation simple flux et ventilation double flux

La maison MARIA est donc modélisée avec une famille de 5 personnes (2 adultes et 3 enfants). Des scénarios relativement classiques d'occupation et d'émission d'humidité sont établis.

### Petit apparte sur les scenarios d'occupation

On pourrait se demander si dans un logement, une personne est un peu plus responsable que les autres de la dégradation de la qualité de l'air. Nous pouvons avoir quelques doutes à la lecture d'une fiche de la CRAM d'Alsace qui sensibilise la population à la production d'humidité !





FIGURE 4.31: Illustration d'une fiche de sensibilisation de la CRAM d'Alsace

La fiche présente également une illustration sur les sources d'humidité dans la maison et nous pouvons constater que les scénarios de présence et d'occupation utilisés dans les travaux de Juslin Koffi sont en accord avec la CRAM d'Alsace. Est-ce bien la femme qui est responsable d'une émission plus importante de CO<sub>2</sub> par sa plus grande présence à la maison (hasard ou non, notons qu'elle est accompagnée de ses enfants...)? Cette question est également soulevée à la lecture des scénarios d'occupation : la femme serait-elle responsable d'une grande partie de dégagement d'humidité et d'émission de COV par sa présence en cuisine (cette fois-ci, c'est sûr, ce n'est pas un hasard, elle n'est pas accompagnée...)?

| Occupant  | Jours ouvrés             | Week-end                                 |
|-----------|--------------------------|------------------------------------------|
| Homme     | 0:00-7:00<br>18:00-24:00 | 0:00-10:00<br>12:00-24:00                |
| Femme     | 0:00-8:00<br>17:00-24:00 | 0:00-13:00<br>15:00-24:00                |
| Enfant 19 | 0:00-8:00<br>18:00-24:00 | 2:00-17:00                               |
| Enfant 16 | 0:00-8:00<br>17:00-24:00 | 0:00-15:00<br>17:00-20:00<br>23:00-24:00 |
| Enfant 13 | 0:00-8:00<br>17:00-24:00 | 0:00-12:00<br>15:00-24:00                |

Tableau 4.3 : Scénarios de présence dans la maison.

FIGURE 4.32: Scénario de présence



|              | Occupant  | Cuisine                   | Séjour                                                 | Chambre 1                                                | Chambre 2                                                           | Chambre 3                                             | Chambre 4                            |
|--------------|-----------|---------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Jours ouvrés | Homme     |                           | 6:00-7:00<br>18:00-23:00                               |                                                          |                                                                     |                                                       | 23:00-6:00<br><i>dort 23:00-6:00</i> |
|              | Femme     | 7:00-8:00<br>17:00-18:00  | 6:00-7:00<br>18:00-23:00                               |                                                          |                                                                     |                                                       | 23:00-6:00<br><i>dort 23:00-6:00</i> |
|              | Enfant 19 |                           | 7:00-8:00<br>18:00-19:00                               | 19:00-7:00<br><i>dort 23:00-7:00</i>                     |                                                                     |                                                       |                                      |
|              | Enfant 16 |                           | 7:00-8:00<br>18:00-20:00                               |                                                          | 17:00-18:00<br>20:00-7:00<br><i>dort 22:00-7:00</i>                 |                                                       |                                      |
|              | Enfant 13 |                           | 7:00-8:00<br>18:00-21:00                               |                                                          |                                                                     | 17:00-18:00<br>21:00-7:00<br><i>dort 22:00-7:00</i>   |                                      |
| Week-end     | Homme     |                           | 8:00-10:00<br>12:00-24:00                              |                                                          |                                                                     |                                                       | 24:00-8:00<br><i>dort 24:00-8:00</i> |
|              | Femme     | 9:00-12:00<br>17:00-18:00 | 8:00-9:00<br>12:00-13:00<br>15:00-17:00<br>18:00-24:00 |                                                          |                                                                     |                                                       | 24:00-8:00<br><i>dort 24:00-8:00</i> |
|              | Enfant 19 |                           | 12:00-13:00                                            | <i>dort 2:00-12:00</i><br>13:00-17:00<br>pas à la maison |                                                                     |                                                       |                                      |
|              | Enfant 16 |                           | 11:00-12:00<br>17:00-19:00<br>23:00-24:00              |                                                          | 12:00-15:00<br>19:00-20:00<br>24:00-11:00<br><i>dort 1:00-11:00</i> |                                                       |                                      |
|              | Enfant 13 |                           | 10:00-12:00<br>15:00-16:00<br>18:00-24:00              |                                                          |                                                                     | 16:00-18:00<br>24:00-10:00<br><i>dort 24:00-10:00</i> |                                      |

Tableau 4.4 : Scénarios d'occupation des pièces principales et de la cuisine.

FIGURE 4.33: Scénario d'occupation

### Simulation numérique : les débits de ventilation

La première conclusion intéressante dans les travaux de Juslin Koffi est l'analyse des débits de ventilation. Nous connaissons les débits de ventilation dans le cas de la ventilation autorégable et l'on sait que si la ventilation hygrorégable réduit fortement ses débits en période d'humidité relative basse, c'est parce qu'elle apporte des débits supérieurs dans les salles de bain, salles d'eau et WC multiples en période d'humidité relative élevée. Quels sont les débits moyens obtenus ?

La ventilation autorégable (simple flux et double flux) permet de respecter les débits demandés par la réglementation. Une courbe présentant la fréquence des débits indique d'ailleurs que ces débits sont toujours supérieurs ou égaux à ceux demandés par la réglementation. En revanche, la ventilation hygrorégable ne permet pas (sauf dans le cas de l'hygrorégable A dans la cuisine) d'atteindre les débits demandés par la réglementation malgré des débits supérieurs en période d'humidité élevée. Les débits élevés de la ventilation naturelle semblent provenir d'un problème de dimensionnement du système. Ainsi dans la suite, nous ne prendrons pas en compte les résultats de la ventilation naturelle. Nous pouvons comparer ces résultats à ce que dit la norme NF EN 13779 sur la qualité de l'air en fonction des débits d'air par personne et par heure.

Ce tableau présente des résultats alarmants sur la qualité de l'air dans le cas de systèmes hygrorégables. Les systèmes autorégables sont plus performants, bien que donnant lieu à une qualité de l'air modérée (la norme parle de qualité de l'air excellente, moyenne, modérée et enfin médiocre).

|                            | Cuisine (m³/h) | Salle de bain (m³/h) | Salle de bains<br>(douche) (m³/h) | WC (m³/h) |
|----------------------------|----------------|----------------------|-----------------------------------|-----------|
| Autoréglable<br>(SF et DF) | 66             | 31                   | 30                                | 15        |
| Hygroréglable A            | 48             | 24                   | 19                                | 7         |
| Hygroréglable B            | 38             | 21                   | 17                                | 6         |
| Ventilation Naturelle      | 55             | 41                   | 55                                | 54        |
| Réglementation             | 45             | 30                   | 30                                | 15        |

FIGURE 4.34: Débits moyens extraits sur la simulation en fonction du système de ventilation

|                            | Débit moyen total extrait<br>(m³/h) | Débit moyen extrait par<br>personne (m³/h) | QAI selon la norme NF EN<br>13779 |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| Autoréglable<br>(SF et DF) | 142                                 | 28                                         | modérée                           |
| Hygroréglable A            | 98                                  | 20                                         | médiocre                          |
| Hygroréglable B            | 81                                  | 16                                         | médiocre                          |

FIGURE 4.35: Qualification de l'air intérieur selon la norme NF EN 13779 en fonction du système de ventilation

Les figures suivantes présentent les fréquences cumulées du renouvellement de l'air dans les pièces principales (renouvellement de l'air mesuré dans le cadre de la simulation).

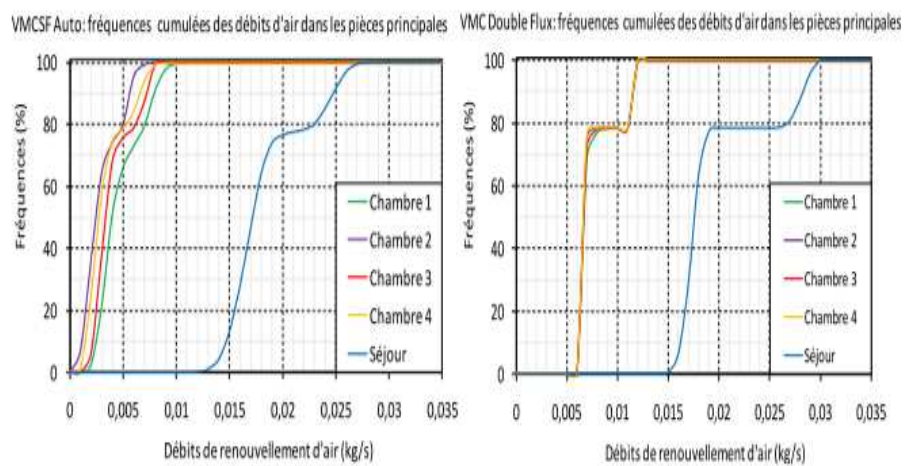


FIGURE 4.36: Fréquence cumulée des débits d'air renouvelés dans les pièces principales - cas de l'autoréglable

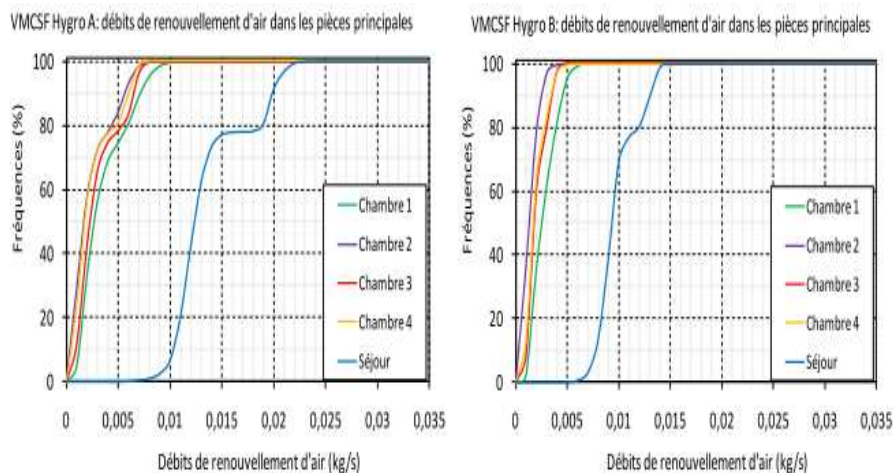


FIGURE 4.37: Fréquence cumulée des débits d'air renouvelés dans les pièces principales - cas de l'hygroréglable

Il aurait été intéressant d'étudier ces résultats par typologie de logement et en fonction du mode d'occupation (personnes actives, personnes âgées, famille nombreuse...) afin de valider ou de nuancer ces résultats.

Les résultats obtenus nous permettent de disposer des débits d'infiltrations et d'exfiltrations obtenus au travers de l'enveloppe. Les trois systèmes de ventilation simple flux présente des débits d'infiltrations assez élevés : de 50 m<sup>3</sup>/h pour l'hygréglable A à 105 m<sup>3</sup>/h pour l'autoréglable. Dans le cas du système de ventilation double flux qui présente globalement un bilan neutre, les débits d'infiltrations et d'exfiltrations sont chacun de 30 m<sup>3</sup>/h. C'est autant de débit qui ne passe pas au travers de l'échangeur thermique... Le système de ventilation simple flux, qui met en dépression la maison, accentue ce phénomène d'infiltrations. L'air ne prend pas toujours le chemin attendu en raison des effets du vent et dans certains cas, cela amène à une pollution de zones qui ne devraient pas être touchées. La maison pourrait être dotée d'une étanchéité à l'air beaucoup plus performante, elle serait ainsi moins sensible aux effets du vent sur les parois. Dans un premier temps, la réaction serait de limiter cet effet par une plus forte étanchéité à l'air de la maison. Mais dans ce cas, le système de ventilation simple flux pourrait s'avérer encore moins performant d'un point de vue de la qualité de l'air, puisqu'une partie non négligeable du renouvellement de l'air semble provenir des imperfections de l'enveloppe? C'est justement ce que le journal CVC a étudié dans son numéro 272 (janvier/février 2012).

Dans le cas de son étude, l'équipe du CVC relève que « dans le cas d'un système de VMC

simple flux hygro B installé dans un logement conforme à la RT2005, les débits entrants par la perméabilité représentent environ 90% du débit total entrant. Par conséquent, renforcer l'étanchéité du bâti, en passant de  $1,3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$  (RT2005) à  $0,6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$  (RT2012) conduit à une réduction du débit total entrant de 24% et dégrade la qualité de l'air (modérée à médiocre). ». Le cas de la double flux est également analysé. Le système dépendant beaucoup moins des infiltrations dans l'enveloppe, la qualité de l'air est dégradée mais dans une moindre mesure (moyenne à modérée). Ces résultats de qualité de l'air obtenue confirme les résultats de Justin Koffi présentés plus haut. La figure suivante présente les résultats obtenues dans l'étude de l'équipe du CVC.

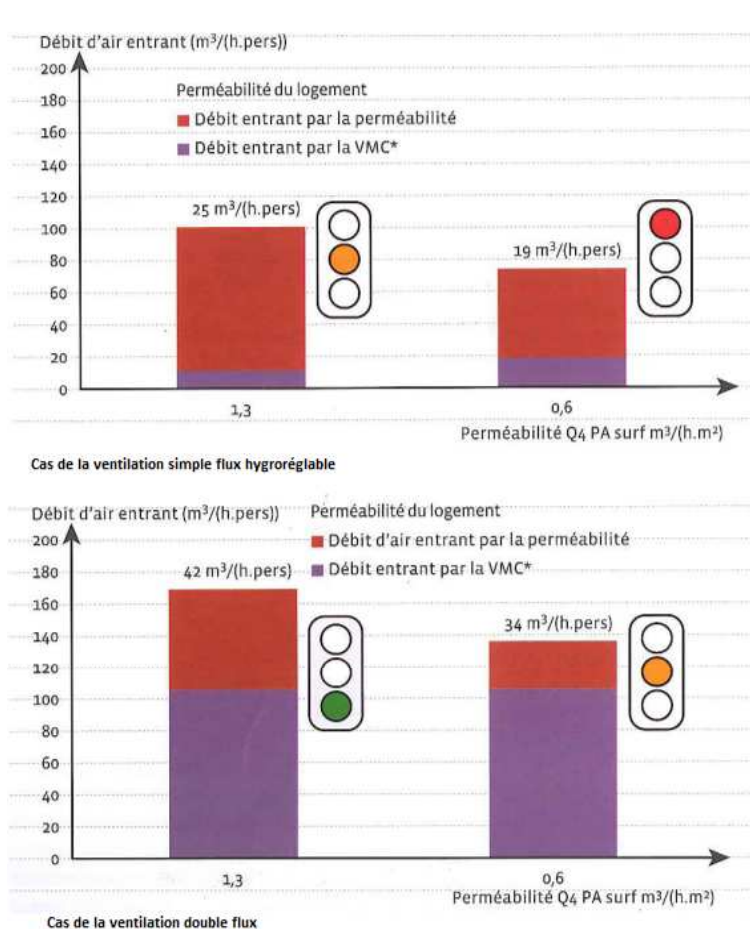


FIGURE 4.38: Extrait de l'article du CVC sur la qualité de l'air dans les logements BBC

### Simulation numérique : évacuation des polluants

La simulation numérique permet également d'analyser l'évacuation de certains polluants émis de façon à reproduire certaines pollutions dans un logement. Nous analyserons ici les pollutions humaines ( $\text{CO}_2$ ) pour faire une comparaison avec l'article de Laverge & al vu au paragraphe précédent et sur les COV puisqu'ils ne se comportent pas comme un polluant lié à l'activité humaine, leur émission étant continue. Le modèle est dit simplifié et ne traite que des transferts

aérauliques (pas de simulation d'adsorption, de sédimentation, de suspension, etc.). Les résultats de concentration en CO<sub>2</sub> sont sans équivoques. Les systèmes de ventilation simple flux sont les seuls à dépasser des niveaux de confinement qui vont au-delà de la Valeur à Risque Limitée établie à 2 460 ppm donnée par l'OMS. Dans la chambre des parents et dans l'une des chambres d'enfants, cette valeur est dépassée 40 à 60% du temps avec le système hygro A et 60% du temps avec le système hygro B. Alors que le système de ventilation double flux ne dépassent le seuil de confinement de 1 000 ppm seulement 30% du temps dans l'une de chambres d'enfant, 15% du temps dans une autre chambre d'enfant et 40% du temps dans le salon. Ce système amène enfin à dépasser 60% du temps le seuil de tolérance fixé par la France (1 300 ppm) dans la chambre de parents. L'écart est donc d'environ 1 000 ppm dans la chambre des parents pour une même fréquence cumulée. Plusieurs conclusions peuvent être formulées :

- De manière générale, les débits de ventilation réglementaire ne semblent pas être suffisant pour évacuer correctement le CO<sub>2</sub>.
- Les systèmes de ventilation simple flux sont beaucoup moins performants que le système double flux pour l'évacuation du CO<sub>2</sub>.
- La régulation sur l'humidité, censée permettre une évacuation des polluants liés à l'activité humaine, ne semble pas fonctionner dans le cas du CO<sub>2</sub> (c'est ce que nous avons observé grâce à l'article de Laverge & al lors de la comparaison de mode de régulation).

Les résultats obtenus lors de l'évaluation des systèmes de ventilation par rapport à l'évacuation d'un COV est également assez parlante. L'auteur a choisi l'alpha-pinène, présent dans la composition du parquet et réalise sa simulation en période de chauffe. Dans la présentation des résultats, pour le système de référence (la ventilation simple flux autoréglable), les concentrations obtenues sur chaque pièce de vie sont présentées en  $\mu g/m^3$ . Les lignes suivantes du tableau présente la concentration obtenue pour les autres systèmes de ventilation rapportée à la concentration du système de référence.

|                                  | Concentrations moyennes normalisées en alpha-pinène (C <sub>moy</sub> /C <sub>ref</sub> ) |           |           |           |        |       |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|
|                                  | Chambre 1                                                                                 | Chambre 2 | Chambre 3 | Chambre 4 | Séjour | MARIA |
| C <sub>ref</sub> ( $\mu g/m^3$ ) | 15,6                                                                                      | 21        | 16,7      | 17,9      | 10,1   | 14,4  |
| VMC double flux                  | 0,54                                                                                      | 0,33      | 0,47      | 0,39      | 0,93   | 0,58  |
| VMC Hygro A                      | 1,45                                                                                      | 1,32      | 1,43      | 1,39      | 1,37   | 1,38  |
| VMC Hygro B                      | 1,75                                                                                      | 2,06      | 1,94      | 1,73      | 1,89   | 1,88  |
| V. naturelle                     | 0,65                                                                                      | 0,58      | 0,63      | 0,61      | 0,87   | 0,69  |

FIGURE 4.39: concentrations moyennes normalisées en alpha-pinène en fonction des systèmes de ventilation

Le système de la ventilation double-flux permet quasi-systématiquement de diminuer de moitié les concentrations du COV par rapport à la simple flux autoréglable alors que les systèmes hygroréglables ont pour effet de multiplier ces concentrations par au moins 1,3 pour l'hygro A et par 1,75 et jusqu'à 2 pour l'hygro B. Les débits de ventilation sont mis en cause ici, mais étant donné le rapport entre l'autoréglable et la double flux, nous pouvons également conclure que le principe d'insufflation dans les chambres conjoint au principe d'extraction dans les pièces de soufflage participe à la bonne évacuation des polluants.

L'humidité est également traitée. Les résultats obtenus indiquent que globalement, les systèmes de ventilation permettent de rester dans des conditions d'humidité relative globalement acceptables (inférieure à 70%). En revanche, nous constatons que dans le cas de la ventilation simple flux hygroréglable, qui assure un grand débit au-delà d'une certaine valeur d'humidité relative détectée dans la pièce humide, les valeurs d'humidité élevées sont plus fréquentes que dans les cas de ventilation autoréglable double flux. Nous savons que au-delà d'une humidité relative de 65%, l'environnement est plus propice au développement des moisissures et des blattes et acariens. Par ailleurs, nous avons pu observer au cours des recherches réalisées sur les toxines que leur présence et leur développement sont plus liés à une humidité localisée sous forme d'eau liquide qu'à une humidité relative globale de la pièce. Or le risque de condensation au contact d'une paroi froide s'accroît avec le taux d'humidité relative de l'air contenu dans la pièce et entrant au contact de cette paroi.

#### 4.4.4 Les systèmes de ventilation et la qualité de l'air intérieur

L'augmentation récente des maladies respiratoires et les études de plus en plus nombreuses montrant le lien entre ces maladies et la qualité de l'air intérieur amènent à voir le bâtiment autrement. Étant donné le temps passé dans cet espace clos, il doit être un lieu de vie sain. La diminution à la source des émissions constitue un objectif prioritaire, mais elle ne peut pas résoudre l'ensemble des situations de pollutions et est encore loin d'être opérationnelle. Nous avons pu constater dans cette partie que non seulement les débits de ventilation avait un véritable impact sur la qualité de l'air mais aussi que le type de ventilation joue sur la diffusion des polluants au travers du logement. La ventilation double flux apparaît comme le système le plus efficace. Quelles sont les conséquences énergétiques de la mise en œuvre de cet équipement ? Nous comparerons dans la partie suivante les consommations liées au chauffage, les consommations électriques et la question du confort d'été en fonction du système de ventilation.

### 4.5 Consommations et confort thermique

Dans cette partie, nous avons effectué sur un bâtiment de 24 logements collectifs une simulation thermique dynamique de façon à comprendre l'impact des différents systèmes de ventilation sur les consommations énergétiques et sur le confort d'été. Le bâtiment est situé près de Rennes. Il est orienté Nord-Sud, l'ensemble des logements sont desservis par une coursive extérieure au Nord (coursive désolidarisée des planchers intermédiaires du logement). C'est un bâtiment plutôt performant, les parois sont assez bien isolées (voir tableau suivant), les vitrages sont essentiellement situés au Sud et disposent de casquette de façon à limiter les apports solaires en été. Le bâtiment comporte 17 T<sub>2</sub>, 4 T<sub>3</sub> et 3 T<sub>4</sub>.

La simulation a été réalisée sur le logiciel TRNSYS version 16. Ce logiciel de simulation thermique dynamique nous permettra d'intégrer des scénarios d'occupation, d'apports internes, de masques pour les apports solaires, de débits de ventilation prenant en compte la présence d'un échangeur à certaines périodes de l'année et de mise en chauffe du logement.

| Parois            | U (W/m².K)            |
|-------------------|-----------------------|
| Mur Ossature Bois | 0,16                  |
| Plancher bas      | 0,15                  |
| Toiture terrasse  | 0,15                  |
| Toiture légère    | 0,11                  |
| Vitrage           | 1,6 (U <sub>w</sub> ) |

FIGURE 4.40: Coefficients de déperditions des parois et vitrages du bâtiment

**Les cas de ventilation** étudiés sont la ventilation simple flux hygroréglable B (système très couramment choisi aujourd’hui pour atteindre le niveau BBC) et la ventilation double flux individuelle. Dans le premier cas, les logements sont équipés d’un système de ventilation collective hygroréglable. Le caisson d’extraction utilisé est un caisson basse consommation. Dans le cas de la ventilation double flux, nous avons décidé de proposer un système de ventilation double flux individuelle (malgré un surcoût à l’investissement et un entretien plus long car individualisé). Ceci pour trois raisons :

- Dans un bâtiment collectif, chacun régule sa température de confort dans son logement et chacun est libre de ne pas chauffer son logement en période d’inoccupation (vacances...). De façon à ce que chacun récupère « sa » chaleur, la ventilation est prévue de manière individuelle.
- Il est plus facile d’obtenir un meilleur rendement sur des petits débits, donc sur des ventilations individuelles. Par ailleurs, les pertes de charges d’un système individuel sont moindres qu’avec un système collectif.
- Le bâtiment étant conçu en longueur, d’un point de vue sécurité au feu, acoustique, taille de faux-plafond, limitation des déperditions, il est plus pertinent de proposer un système individuel.

Les débits d’air ont été appliqués en fonction des avis techniques des fournisseurs pour la ventilation simple flux hygroréglable, de la réglementation pour la ventilation autoréglable double flux et de la répartition donnée dans la réglementation thermique entre les débits de base et les débits de pointe, c’est-à-dire :





FIGURE 4.41: Plans de niveau du projet des 24 logements collectifs

$$m_{\text{moyens}} = (m_{\text{base}} \times (168 - 7) + m_{\text{pointe}} \times 7) / 168$$

avec  $m_{\text{base}}$ , correspondant au débit de base donné dans la réglementation ou dans l'avis technique,

$m_{\text{pointe}}$ , le débit de pointe incluant le grand débit en cuisine, 168, correspondant aux 168 heures de la semaine, 7, correspondant aux 7 heures d'utilisation du grand débit.

Les débits et les taux de renouvellement de l'air sont indiqués dans le tableau suivant.

| Logement   | Système de ventilation | Débit (m³/h) | Taux de renouvellement |
|------------|------------------------|--------------|------------------------|
| T2         | SF hygro B             | 38,7         | 0,34                   |
|            | DF                     | 60           | 0,55                   |
| T2 attique | SF hygro B             | 38,7         | 0,38                   |
|            | DF                     | 60           | 0,64                   |
| T3         | SF hygro B             | 45,9         | 0,29                   |
|            | DF                     | 90           | 0,6                    |
| T3 attique | SF hygro B             | 45,9         | 0,27                   |
|            | DF                     | 90           | 0,58                   |
| T4         | SF hygro B             | 52,4         | 0,27                   |
|            | DF                     | 105          | 0,55                   |

FIGURE 4.42: Débits et taux de renouvellement d'air en fonction du système de ventilation et de la typologie de logement

L'échangeur de la double flux a une efficacité de 90% (valeur certifiée pour un système existant). Notons qu'il existe aujourd'hui certains échangeurs permettant d'atteindre 96 à 98% de rendement. En hiver, une température d'entrée d'air est appliquée en fonction du rendement de l'échangeur. Cette température est la suivante :

$$T_{\text{airneuf}} = \text{Rendement} \times (T_{\text{reprise}} - T_{\text{ext}}) + T_{\text{ext}}$$

Avec  $T_{\text{airneuf}}$ , la température de l'air neuf au soufflage,

Rendement, le rendement de l'échangeur,

$T_{\text{reprise}}$ , la température de l'air vicié repris dans le caisson,

$T_{\text{ext}}$ , la température de l'air extérieur.

Une infiltration est intégrée à hauteur de 0,3 vol/h.

**Les apports internes** sont liés à la présence des occupants et à l'éclairage (les appareils électroménagers sont ici négligés). Les occupants sont présents en semaine le matin jusqu'à 8h30 et reviennent le soir à 18h00. Le week end, ils sont absents de 14h00 à 18h00. Ils sont considérés comme étant en activité faible, ce qui représente un apport de 120 W par personne selon la norme ISO 7730. On considère un apport de 10 W/m<sup>2</sup> pour l'éclairage, sachant que le recours à l'éclairage artificiel est modélisé, dans la simulation, en fonction de l'éclairage naturel.

**Les apports externes** correspondent aux apports solaires. Une casquette au niveau de chaque plancher intermédiaire sur la façade Sud du bâtiment est modélisée. Le bâtiment est en effet optimisé sur ce point, la très grande majorité des vitrages se situant au Sud.

#### 4.5.1 En été

Le confort d'été est souvent peu abordé dans les questions énergétiques. Le calcul de la réglementation thermique fait ressortir une température intérieure conventionnelle calculée sur une journée chaude de référence au pas de temps horaire. Pour être conforme à la réglementation thermique, il est nécessaire de ne pas dépasser une certaine valeur définie en fonction du bâtiment faisant référence pour le projet en question. Le calcul de la température intérieure conventionnelle ne prend les caractéristiques des matériaux que de manière globale. Un indice d'inertie est donné pour le projet et globalement, sur l'ensemble du bâtiment, les températures sont calculées au pas de temps horaire. On obtient alors une valeur maximale à ne pas dépasser mais la question du confort n'est pas prise en compte.

La simulation thermique dynamique permet d'obtenir des résultats plus fins et fait apparaître la température de la zone concernée heure par heure. La capacité thermique volumique des matériaux composant chaque paroi est prise en compte dans le calcul. Le scénario d'occupation et les apports de chaleur sont intégrés en fonction du projet. Le calcul heure par heure permet de visualiser les périodes d'inconfort et de quantifier cet inconfort. On peut considérer une zone comme confortable si le nombre d'heure où la température intérieure dépasse 28°C est inférieur à 50. Au-delà de 100 heures, la zone est classée comme étant très inconfortable. La question du confort d'été n'est pas anodine, étant donnée le recours à la climatisation en France, phénomène en pleine expansion.

Le confort d'été dépend de plusieurs facteurs dans un logement :

- Les apports internes qui doivent être limités. Ils proviennent de la présence humaine, des éclairages et des équipements. Il n'est pas possible de limiter la présence, mais il est possible de choisir des équipements et des luminaires efficaces.
- Les apports externes qui doivent être optimisés, en fonction de la saison, grâce à une bonne exposition du bâtiment et par la présence d'occultations fixes ou mobiles au niveau des vitrages.
- L'évacuation de l'ensemble des apports grâce à des débits d'air suffisants.

L'exposition du bâtiment est ici optimale : les principaux vitrages sont au Sud et des casquettes ont été prévues permettant de limiter la pénétration du soleil en période estivale tout en profitant des apports solaires en hiver lorsque le soleil est bas. Les apports internes ont été présentés dans le paragraphe précédent. Nous avons fait le choix de forcer le trait sur le renouvellement de l'air : ce dernier ne passe que par le système de ventilation et par les infiltrations

au travers de l'enveloppe, ceci afin juger de l'efficacité du seul système de ventilation pour l'évacuation des excès de chaleur du logement sans tenir compte du comportement des occupants.

Le tableau ci-après représente le nombre d'heures d'inconfort pour chaque typologie de logement et en fonction du type de ventilation. Nous constatons que le système de ventilation double flux permet de diminuer par 4 à 5 le nombre d'heures d'inconfort par rapport au système de ventilation simple flux. Dans aucun des logements, la ventilation simple flux ne permet d'apporter un confort suffisant. Il est également intéressant de constater que dans les deux cas de ventilation, le débit du T4 ne semble pas suffisant (ventilation double flux) voire très insuffisant (ventilation simple flux). Dans ce cas, les apports internes ramenés au m<sup>2</sup> sont plus élevés dans le T4, or, le taux de renouvellement de l'air est équivalent à celui du T2. Par ailleurs, les T4 bénéficient de moins de surface possédant une inertie intéressante que les autres logements.

| Système de ventilation      | Nombre d'heures d'inconfort pour les T2 | Nombre d'heures d'inconfort pour les T3 | Nombre d'heures d'inconfort pour les T4 |
|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Simple flux hygroréglable B | 129                                     | 112                                     | 450                                     |
| Double flux                 | 33                                      | 24                                      | 115                                     |

FIGURE 4.43: Comparaison du nombre d'heures d'inconfort par typologie de logements et en fonction du type de ventilation

Rappelons que cette étude a été réalisée sur un bâtiment performant pour lequel les apports solaires ont été pris en compte dès la conception (ce qui est encore trop rarement le cas) et que

la région considérée est la Bretagne, région où les températures estivales sont plutôt basses par rapport à d'autres territoires français.

#### 4.5.2 En hiver

Nous avons pu le voir précédemment, le confort thermique dépend à la fois des conditions de températures (température de l'air et température des parois), des conditions d'humidité, des conditions aérauliques (vitesse de l'air au contact de la peau) et de facteurs psychologiques. En hiver, une température de confort homogène et une vitesse de déplacement de l'air faible apportent un certain confort thermique aux usagers. Le système de ventilation ne doit pas provoquer des courants d'air froid mais apporter néanmoins des débits d'air hygiéniques suffisants. Par ailleurs, pour être conforme aux exigences des réglementations thermiques, le système choisi doit permettre de limiter les déperditions par renouvellement de l'air. Ces déperditions sont liées aux débits de la ventilation mécanique et au débit d'infiltrations à travers les parois, à la température de l'air entrant et à l'humidité contenue dans cet air. Le besoin en chauffage lié à ces déperditions est le suivant :

$$Q_{ch} = \dot{m}_{air} \times c_p \times (T_{int} - T_{ext}) + \dot{m}_{air} \times L_v \times (\omega_{int} - \omega_{ext})$$

sachant que les débits d'air sont équivalents à

$$\dot{m}_{airSF} = \dot{m}_{infiltration} + \dot{m}_{vmc} \text{ pour la ventilation simple flux}$$

et à

$$\dot{m}_{airDF} = \dot{m}_{infiltration} + (1 - \epsilon_{changeur}) \times \dot{m}_{vmc} \text{ pour la ventilation double flux}$$

avec  $Q_{ch}$  , les besoins en chauffage,  
 $\dot{m}_{air}$ , les débits d'air totaux,  
 $\dot{m}_{infiltration}$ , les débits d'air liés aux infiltrations,  
 $\dot{m}_{vmc}$ , les débits d'air liés à la ventilation mécanique,  
 $T_{int}$  et  $T_{ext}$ , les températures intérieures et extérieures,  
 $\omega_{int}$  et  $\omega_{ext}$ , l'humidité absolue de l'air intérieur et de l'air extérieur,  
 $c_p$ , la chaleur spécifique de l'air,  
 $L_v$ , la chaleur latente d'évaporation,

Il est simple de déterminer les débits d'air entrant liés à la ventilation mécanique puisqu'ils dépendent uniquement du système. En revanche, les débits d'air liés aux fuites à travers l'enveloppe dépendent de la forme d'ouverture de ces fuites et de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Si un test de perméabilité à l'air a été effectué sur un bâtiment ou si l'on se fixe un objectif de perméabilité à l'air, on peut en déduire les fuites annuelles par les débits obtenus sous 4 Pa de différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la façon suivante :

$$\dot{m}_{infiltration} = \Delta p \times P_{\Delta p_4} \times A \times \rho \times (|\Delta p| / \Delta p_4)^n$$

avec  $\Delta p$ , la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur,  
 $P_{\Delta p_4}$ , la valeur de la perméabilité à l'air donnée sous 4 Pa de différence entre l'intérieur et l'extérieur,  
 $A$ , la surface de parois froides,  
 $\rho$ , la masse volumique,  
 $\Delta p_4$ , les 4 Pa d'écart de la valeur faisant référence  
et  $n$ , l'exposant caractérisant l'écoulement d'air à travers la paroi (pris égal à 1/2 si l'écoulement est turbulent, égal à 1 si l'écoulement est laminaire, et pris égal à 2/3 généralement pour ce type d'orifice).

Les modes de calcul pour les différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur ont été précisés précédemment dans le paragraphe sur la ventilation naturelle. Notons qu'en cas de ventilation simple flux, le logement est mis sous dépression, incitant ainsi l'air à passer par les orifices les plus immédiats par rapport aux bouches d'extraction. Ainsi dans ce cas, les débits d'infiltrations sont plus élevés qu'en ventilation double flux.

La ventilation simple flux hygroréglable a pour objectif de limiter les débits d'air neuf diminuant ainsi les déperditions de chaleur par rapport à une ventilation simple flux autoréglable. En revanche, la ventilation autoréglable double flux avec échangeur de chaleur conservera des débits relativement élevés mais générera moins de déperditions de chaleur. D'abord parce que l'air est préchauffé (à hauteur de l'efficacité de l'échangeur) et il existe aujourd'hui de très bons échangeurs (rendement supérieur à 90 %). Ensuite, la vapeur d'eau contenu dans l'air froid entrant est échauffée dans l'échangeur et a tendance à s'évaporer, réduisant ainsi les besoins en chauffage dans le logement.

Sur le bâtiment étudié, les besoins en chauffage pour la ventilation simple flux hygréglable de type B sont environ 3 fois plus élevés que dans le cas de la ventilation double flux. Par exemple, pour un T2, il faut compter en moyenne un besoin de 22 kWh/m<sup>2</sup>.an avec une ventilation simple flux hygroréglable B contre seulement 7 kWh/m<sup>2</sup>.an avec la ventilation double flux. Ce résultat était attendu. Dans ce cas, pourquoi il n'est pas fait plus souvent recours à la double flux ?

Une des premières difficultés tient à la présentation des résultats d'une étude thermique issue du calcul réglementaire. Les consommations sont présentées en énergie primaire. L'énergie électrique dispose d'un coefficient de 2,58 appliqué à l'énergie finale pour obtenir l'énergie primaire (coefficient dû notamment au rendement des systèmes de production et à la centralisation de ces systèmes). Le système de ventilation double flux fonctionne avec deux ventilateurs et doit assurer un débit d'air plus élevé. Les consommations en énergie finale ou en énergie primaire sont au moins deux fois plus élevées. En énergie finale, cet écart rapporté au résultat est plutôt faible puisqu'aujourd'hui les équipements disposent de ventilateurs basse consommation. En revanche, lorsqu'est appliqué le coefficient d'énergie primaire, cet écart pèse et fait visiblement augmenter le résultat des consommations. Il n'est pas rare que ce résultat soit source de confusion chez le constructeur ou la maîtrise d'ouvrage, parfois peu habitué à utiliser les rapports entre énergie finale et énergie primaire et qui considère alors que l'effort consenti pour la ventilation double flux n'a apparemment que peu d'intérêt.

Par ailleurs, nous l'avons évoqué plus haut, une autre raison qui limite le recours à la ventilation double flux est souvent le prix du système en comparaison à un système simple flux. A partir du constat des besoins en chauffage fait précédemment, il paraît intéressant de comparer

| Système de ventilation    | Besoin moyen chauffage des T2 (kWh/m <sup>2</sup> .an) | Besoin moyen chauffage des T3 (kWh/m <sup>2</sup> .an) | Besoin moyen chauffage des T4 (kWh/m <sup>2</sup> .an) | Déperdition max ensemble des logements (kW) |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Simple flux hygroréglable | 22                                                     | 21                                                     | 14                                                     | 60                                          |
| Double flux               | 7                                                      | 8                                                      | 5                                                      | 40                                          |

FIGURE 4.44: Evaluation des besoins en chauffage en fonction du mode de ventilation

les coûts de fonctionnement annuels des deux systèmes. Nous avons réalisé cette comparaison sur la base des besoins en chauffage estimés lors de la simulation thermique dynamique. Afin de faciliter l'opération, les systèmes de chauffage restent identiques quelque soit le système de ventilation : il s'agit de chaudière individuelle gaz, système très couramment utilisé aujourd'hui. Si la comparaison semble effectivement facilitée, la pertinence d'un tel système de chauffage avec un bâtiment aussi performant dans le cas d'une ventilation double flux n'est pas immédiate. Les chaudières proposées aujourd'hui dispose d'une modulation de puissance telle que la puissance basse est supérieure au besoin relevé lors des calculs de l'étude. Nous pouvons imaginer d'autres systèmes plus adaptés dans le cas où le besoin en chauffage a été réduit mais où subsiste le besoin en eau chaude sanitaire, citons par exemple le recours à une chaufferie collective, permettant de mutualiser l'investissement de l'équipement ainsi que la maintenance, effet intéressant dès que l'on dépasse une vingtaine de logement.

Sur des systèmes identiques de chaudières individuelles, les besoins en chauffage ont été estimés à partir de la simulation thermique dynamique, les rendements de production, de distribution et d'émission ont été appliqués, le résultat nous permet d'approcher une estimation des consommations de chauffage. Le recours à l'électricité pour les systèmes de ventilation a été

évalué en utilisant la formule de la réglementation thermique, formule semblable à celle des débits. Une maintenance a été appliquée dans tous les cas de ventilation. Dans les faits, elle n'est que très rarement réalisée sur les installations de ventilation simple flux, mais nous avons pu constater plus haut que cela génère une réelle perte d'efficacité du système de ventilation. Le tableau ci-après permet d'identifier les coûts des deux systèmes selon les postes.

En année 1, les coûts liés au fonctionnement sont moindres pour le système de ventilation double flux. Cette différence est importante pour les consommations de chauffage, mais les coûts supérieurs pour le fonctionnement de la ventilation et de la maintenance amoindrissent l'écart. L'impact de l'investissement n'est pas négligeable. Nous proposons donc de réaliser une comparaison dans le temps en prenant en compte l'inflation des énergies. Suite à des échanges avec différents professionnels du secteur de l'énergie et à la lecture des études réalisées par les différents syndicats, nous nous basons sur les rythmes suivants : 2% d'inflation annuelle pour la maintenance, 4% d'inflation annuelle pour l'électricité, 8% d'inflation annuelle pour le gaz.

Les courbes de coûts annuels intègrent les inflations données précédemment, ainsi que l'amortissement des équipements et permettent de constater qu'il faut environ 12 ans avant que les coûts liés à la ventilation double flux soient inférieurs aux coûts liés à la ventilation simple flux. Le temps de retour actualisé est estimé à 20 ans. Sur cette base, le système de la ventilation double flux semble moins séduisant que la ventilation simple flux, puisque le système n'est rentabilisé qu'à sa toute fin de vie.



| Comparaison des coûts annuels et de l'investissement         |                           |             |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------|
|                                                              | Simple flux hygroréglable | Double Flux |
| Estimation des consommations                                 |                           |             |
| Besoins Chauffage – calcul STD                               | 24 841 kWh                | 8 412 kWh   |
| rendement génération                                         | 0,95                      | 0,95        |
| rendement distribution                                       | 0,9                       | 0,9         |
| rendement émission                                           | 0,9                       | 0,9         |
| Consommations chauffage                                      | 32 282 kWh                | 10 932 kWh  |
| Consommations Électricité Ventilation – calcul réglementaire | 2 450 kWh                 | 5 193 kWh   |
| Coût de fonctionnement                                       |                           |             |
| Gaz (Chauffage)                                              |                           |             |
| Abonnement TTC (TVA 5,5%)                                    | 1470,72                   | 1470,72     |
| Prix énergie c€/kWh PCI TTC (19.6%)                          | 9,00                      | 9,00        |
| TICGN (c€/kWh)                                               | 0,12                      | 0,12        |
| Montant approvisionnement gaz € TTC                          | 4 415 €                   | 2 468 €     |
| Électricité (Ventilation)                                    |                           |             |
| Prix énergie c€/kWh TTC (19.6%)                              | 12,25                     | 12,25       |
| Consommations – calcul réglementaire                         | 2450                      | 4725,55     |
| Montant approvisionnement gaz € TTC                          | 300 €                     | 579 €       |
| Maintenance                                                  |                           |             |
| Maintenance annuelle €TTC                                    | 1 200 €                   | 2 400 €     |
| Coût total maintenance annuelle € TTC                        | 1 200 €                   | 2 400 €     |
| Total coût de fonctionnement                                 | 5 915 €                   | 5 446 €     |
| Investissement € HT                                          |                           |             |
| Système de ventilation                                       | 14 400 €                  | 84 000 €    |
| Investissement lié à la ventilation €HT                      | 14 400 €                  | 84 000 €    |

FIGURE 4.45: Comparaison des coûts de fonctionnement en fonction du mode de ventilation

Ce calcul a été réalisé sur la base des mêmes équipements de chauffage de façon à présenter de simplement les deux types de systèmes. Il reste que le recours à une ventilation double flux peut être le point de départ d'une réflexion autour des systèmes de production de chaleur. Le besoin de chauffage divisé par trois grâce à l'échangeur de chaleur peut être valorisé par

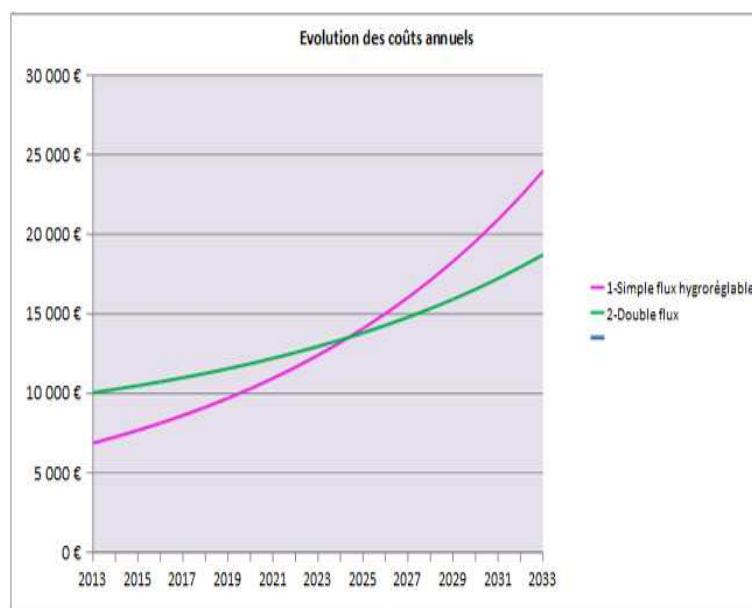


FIGURE 4.46: Evolution des coûts annuels en fonction de la ventilation

différentes solutions énergétiques qui permettraient alors de diminuer les coûts de fonctionnement de l'ensemble du bâtiment. Il est en effet possible de proposer un bâtiment beaucoup plus intéressant financièrement malgré la présence de la ventilation double flux.

Notons également que ces coûts ne prennent en compte que les consommations énergétiques et la maintenance immédiates. C'est précisément ce qui peut être reproché aux choix réalisés aujourd'hui : il n'y a pas de prise en compte du confort thermique des usagers ni du coût que peut faire peser sur la société un renouvellement de l'air insuffisant. Les questions d'inconfort d'été entraîne, en France, un investissement dans un système de climatisation et impacte les consommations énergétiques ainsi que la tension sur le réseau d'électricité en été. En hiver, le soufflage d'un air à température extérieure génère souvent des comportements dangereux comme nous avons pu le constater lors de l'étude du monoxyde de carbone (bouches d'entrée d'air et d'extraction obturées). Enfin, il a été évalué le coût pour la société des problématiques de la qualité de l'air. Ce coût semble suffisamment important pour que des solutions soient intégrées dès la conception d'un bâtiment.

#### 4.5.3 Consommations et émissions de gaz à effet de serre

Rappelons les deux objectifs principaux de la mise en place des réglementations thermiques :

- la réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre,
- la réduction des consommations énergétiques.

Sur ces deux aspects, il est indiscutable que la ventilation double flux permet d'atteindre ces objectifs :

- Les consommations énergétiques de chauffage sont divisées par près de 3 à 4 fois par rapport à un système de ventilation simple flux hygroréglable qui, pourtant, est conçu pour limiter les débits de ventilation. Les consommations électriques liées à la présence d'un ventilateur supplémentaire et à des débits plus élevées restent suffisamment faibles pour maintenir un niveau global de consommations (chauffage et ventilateur) deux fois moins élevé avec la ventilation double flux. Il est toutefois important de considérer que ces consommations électriques, contrairement à la production de chaleur, sont souvent issues d'une production centralisée. Ce fait ajouté au rendement des technologies utilisées entraînent une conversion en énergie primaire équivalente à 2,58 kWh pour 1 kWh consommé. Nous considérons que ce fait n'est pas immuable et qu'aujourd'hui des solutions existent pour limiter le recours à ce type de production et aller dans le sens souhaité d'une maîtrise de l'énergie (production locale d'électricité individuelle ou collective et / ou recours à un fournisseur d'électricité proposant ce type de production).
- Les émissions de gaz à effet de serre ont été évaluées à partir de la simulation réalisée précédemment. Les facteurs de conversion pris en compte sont des facteurs conventionnels donnés par l'arrêté du 15/09/06 relatifs au diagnostic de performance énergétique (0,084 kg de CO<sub>2</sub> par kWh<sub>ef</sub> d'électricité et 0,234 kg de CO<sub>2</sub> par kWh<sub>ef</sub> de gaz naturel). Le simple recours à la ventilation double flux permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage et à la ventilation de 62% comme le montre le tableau suivant. Ce qui équivaut, sur ce bâtiment, annuellement à 8 aller retour journaliers pendant 220 jours sur un trajet de 20 km (trajet domicile - travail).

Ces éléments ne traduisent qu'une partie des consommations énergétiques évitées puisqu'elles ne prennent pas en compte le recours de plus en plus fréquent à la climatisation.

| Émissions de gaz à effet de serre              |                           |             |
|------------------------------------------------|---------------------------|-------------|
|                                                | Simple flux hygroréglable | Double Flux |
| Émissions annuelles (tCO <sub>2</sub> /an)     |                           |             |
| Émissions annuelles (tCO <sub>2</sub> /an)     | 7,76                      | 2,95        |
| Tonnes de CO <sub>2</sub> évitées annuellement |                           | 4,80        |
| Écart à la référence                           |                           | 62%         |
| Equivalents annuels AR 20km journalier (220 j) |                           | 8           |

FIGURE 4.47: Emissions de gaz à effet de serre liées au chauffage et à la ventilation en fonction du système de ventilation

## Chapitre 5

# Conclusion

Les exigences énergétiques imposées dans le cadre de la lutte contre le changement climatique et la raréfaction des ressources fossiles ont amené à apporter toujours plus de nouveaux matériaux dans la construction des logements et à maîtriser de plus en plus les flux d'air entre l'intérieur et l'extérieur d'un logement. Le fait de préserver l'habitat des conditions climatiques pour diminuer la facture énergétique des usagers et de la société serait-il nuisible pour la santé ? Les études montrent que les maladies liées aux pollutions intérieures sont en nette augmentation depuis que le monde de bâtiment travaille à limiter les débits de ventilation. Pourtant, jusqu'à présent, le système de ventilation en France est toujours considéré sur son seul aspect énergétique : réduction des débits pour limiter les déperditions liées au renouvellement de l'air et diminution des consommations électriques. Les équipes de construction continuent d'entrevoir la solution hygrorégable comme idéale, puisqu'aucune autre contrainte que celle énergétique n'existe. Nous avons vu que cette solution est loin d'être satisfaisante d'un point de vue sanitaire. Alors que le label BBC n'est véritablement institué comme un modèle que depuis 2 à 3 ans et que l'obtention de ce label se fait souvent par le recours à des systèmes de ventilation hygro B, nous pouvons craindre que les problématiques de santé présentées précédemment augmentent encore. Les débits institués par l'arrêté de mars 1982 semble plutôt moyennement satisfaisant pour un logement BBC. Si ces débits sont diminués par un système de régulation, et notamment celui basé sur l'humidité relative, la qualité de l'air devient médiocre. Qu'en sera-t-il quand les logements tendront vers les objectifs de bâtiments passifs et de bâtiments à énergie positive en 2020 ? La question sanitaire devient d'autant plus pertinente qu'il apparaît que le système de ventilation simple flux hygrorégable est loin d'être aussi efficace énergétiquement que la ventilation double flux. Nous avons pu constater une diminution par deux des consommations énergétiques (thermiques et électriques).

D'un point de vue sociétal, le recours à une ventilation double flux semble donc contribuer à faire avancer les questions liées aux consommations énergétiques et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, rappelons que la société porte aussi le coût de la qualité de l'air. Ce coût a été estimé entre 12,8 et 38 milliards d'euros chaque année. Ramené au nombre de foyers français (environ 26 millions selon l'Institut National d'Etudes Démographiques), cela coûte chaque année à chaque foyer entre 500 euros et 1500 euros. Ces chiffres concernent l'ensemble des problématiques de la qualité de l'air intérieur, problématiques qui touchent l'ensemble des espaces intérieurs (écoles, bureaux...). Par ailleurs, la qualité de l'air n'est pas liée exclusivement au système de ventilation, elle dépend aussi fortement du choix des matériaux. Cependant, nous avons pu constater combien le choix entre un système de ventilation ou un autre peut influencer la présence et la bonne évacuation des polluants. S'il nous semble difficile de faire une analyse en coût global des systèmes énergétiques en intégrant ces chiffres, il nous paraît indispen-

sable de garder à l'esprit ces résultats économiques et sanitaires. Les objectifs énergétiques ne peuvent pas être séparés des enjeux sanitaires, la qualité des matériaux (réduction des polluants à la source et débits suffisants) tout autant que le choix du mode de ventilation d'un logement relèvent de la responsabilité sociétale des maîtres d'ouvrage et des équipes de maîtrise d'œuvre.

# Bibliographie

- [1] Bernstein J.A., Alexis N., Bacchus H., Bernstein I.L., Fritz P., Horner E., Li N., Mason S., Nel A., Oullette J., Reijula K., Reponen T., Seltzer J., Smith S., Tarlo S.M. *The Health Effects of Non-Industrial Indoor Air Pollution* Journal of Allergy and Clinical Immunology, 3(121), 2008, pp. 585-591.
- [2] Bischof W., Koch A., Gehring U., Fahlbusch B., Wichmann H.E., Heinrich J. *Predictors of High Endotoxin Concentrations in the Settled Dust of German Homes* Indoor Air, 12, 2002, p2-9.
- [3] Casteran B., Ricroch L. *Les logements en 2006 : Le confort s'améliore, mais pas pour tous* Enquête logement INSEE 2006, 1202, 2008.
- [4] Charpin D., Boutin-Forzano S., Chabbi S. *Le taux d'hygrométrie murale, indicateur de la présence de moisissure* Bulletin de l'académie nationale de médecine, 2005, p43-45.
- [5] Chen C.-M., Thiering E., Doekes G., Zock J.-P., Bakolis I., Norbäck D., Sunyer J., Villani S., Verlato G., Täubel M., Jarvis D., Heinrich J. *Geographical variation and the determinants of domestic endotoxin levels in mattress dust in Europ* Indoor Air, 22, 2012, p24-32.
- [6] Chesnel H. *La qualité des logements : L'humidité est le défaut le plus fréquent* Enquête logement INSEE 2002, 971, 2004.
- [7] Courgey S., Oliva J.-P. *La conception bioclimatique Terre Vivante*, 2006, 2008, 239p.
- [8] D'Halewyn M.A., Leclerc J.M., King N., Bélanger M., Legris M., Frenette Y. *Les risques à la santé associés à la présence de moisissures en milieu intérieur* Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels et laboratoire de santé publique du Québec, Institut national de santé publique Québec, 2002.
- [9] Déoux S., Coeudevez C.-S. *Bâtiments, santé, le tour des labels* 2011
- [10] Depecker P. & al *Qualité thermique des ambiances* Cahiers pédagogiques Thermique et Architecture, AFME, 1989, 66p.
- [11] Dimitroulopoulou C. *Ventilation in European dwellings : A review* Building and Environment, 2011, p1-17.
- [12] Driant J.-C *Les conditions de logement des ménages à bas revenus* Enquête logement INSEE 2002, 950, 2004.
- [13] Heinrich J., Topp R., Gehring U., Thefeld, W. *Traffic at Residential Address, Respiratory Health, and Atopy in Adults* Environmental Research, 2 (98), 2005, p240-249.
- [14] Hoek G., Brunekreef B., Goldbohm S., Fischer P., Van den Brandt P.A. *Association between Mortality and Indicators of Traffic-related Air Pollution in the Netherlands : A Cohort Study* The Lancet, 9341 (360), 2002, p1203-1209.
- [15] Janssen N.A., Brunekreef B., Van Vliet P., Aarts F., Meliefste K., Harssema H., Fischer P. *The Relationship between Air Pollution from Heavy Traffic and Allergic Sensitization, Bronchial Hyperresponsiveness, and Respiratory Symptoms in Dutch Schoolchildren* Environmental Health Perspective, 12(111), 2003, p1512-1518.

- [16] INERIS *Exposition aux pesticides dans l'environnement intérieur* 2008.
- [17] Jantunen M., Oliveira Fernandes E., Carrer P. *Promoting actions for healthy indoor air* 2011.
- [18] Koffi Juslin *Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles*, 2005.
- [19] Laverge J., Van Den Bossche N., Heijmans N., Janssens A. *Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies* Building and Environnement, 2011, p1497-1503.
- [20] Martuzevicius D., Grinshpun S.A., Lee T., Hu S., Biswas P., Reponen, T., LeMasters G. *Traffic-related PM<sub>2.5</sub> Aerosol in Residential Houses Located near Major Highways : Indoor versus Outdoor Concentrations* Atmospheric Environment, 27(42), 2008, p6575-6585.
- [21] Mejía J.F., Low Choy S., Mengersen K., Morawska, L *Methodology for Assessing Exposure and Impacts of Air Pollutants in School Children : Data Collection, Analysis and Health Effects A Literature Review* Atmospheric Environment, 4(45), 2011, p813-823.
- [22] Missenard M., Blandin C., Feldmann C. *Climatique Costic*, 2010, 482p.
- [23] Schriver-Mazzuoli L. *La pollution de l'air intérieur* Dunod, 2009, 265p.
- [24] Sivasubramanu S.K, Niemeier R.T., Reponen T. et al. *Assessment of the aerosolization potential for fungal spores in moldy homes* Indoor Air 14, 2004, p405-412.
- [25] Verrier A., Delaunay C., Coquet S., Théaudin K., Cabot C., Girard D., Daoudi J., De Bels F. *Les intoxications au monoxyde de carbone survenues en France métropolitaine en 2007* Bulletin épidémiologique hebdomadaire, 1, 2010, p1-5.
- [26] Rumchev K.B., Spickett J.T., Bulsara M.K., Phillips M.R., Stick S.M. *Domestic exposure to formaldehyde significantly increases the risk of asthma in young children* European Respiratory Journal, 20, 2002, p403-408.
- [27] Slezakova K., Morais S., do Carmo Pereira M. *Indoor Air Pollutants : Relevant Aspects and Health Impacts* Environmental Health, 2011.
- [28] Sippola M.R., Nazaroff W.W. *Modeling particle loss in ventilation ducts* Atmospheric Environment, 37(39-40), 2003, p5597-5609.
- [29] [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be)