



# DOSSIER QUALITE DE L'AIR INTERIEUR

ETUDES SUR LA VENTILATION DES LOGEMENTS

## Table des matières

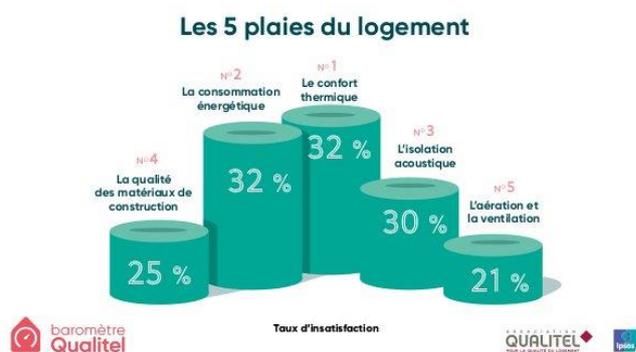
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>CONTEXTE &amp; RAPPEL REGLEMENTAIRE .....</b>	<b>5</b>
1. Réglementation sur la ventilation des logements .....	5
2. Qu'en est-il sur le terrain ?.....	5
3. Quel est l'impact sanitaire pour l'occupant ? .....	6
<b>PARTIE 1 : COMMENT FONCTIONNE LA VENTILATION D'UN LOGEMENT ? .....</b>	<b>7</b>
1. Principe .....	7
2. Systèmes de ventilation .....	7
3. Eléments constitutifs du système de ventilation .....	8
<b>PARTIE 2 : COMMENT L'AIR CIRCULE-T-IL DANS UNE PIECE ? .....</b>	<b>10</b>
1. Présentation de la Maquette.....	10
2. Caractéristiques .....	10
3. Etude de faisabilité .....	12
4. Etude paramétrique sur la maquette .....	14
5. Etude de simulations numériques.....	20
<b>PARTIE 3 : COMMENT LE CO<sub>2</sub> SE DIFFUSE-T-IL DANS UNE PIECE ? .....</b>	<b>24</b>
1. Présentation de l'étude n°1.....	24
2. Présentation de l'étude n°2.....	35
3. Présentation de l'étude n°3.....	39
4. Présentation de l'étude n°4.....	51
<b>PARTIE 4 : QUEL EST L'IMPACT DU DETALONNAGE DE PORTE SUR LA CIRCULATION DE L'AIR DANS UN LOGEMENT ? .....</b>	<b>60</b>
1. Présentation de l'étude .....	60
<b>PARTIE 5 : QUELS SONT LES EFFETS DE L'ENCRASSEMENT D'UN SYSTEME DE VENTILATION MECANIQUE ? .....</b>	<b>66</b>
1. Présentation de l'étude .....	66
2. Suivi du fonctionnement des VMC simple flux hygroréglables.....	72
3. Influence de l'encrassement d'une VMC sur la performance acoustique des entrées d'air .....	73
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>78</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>80</b>

## INTRODUCTION

L'Association QUALITEL a été créée au milieu des années 70 afin de répondre à de nouvelles préoccupations liées à la qualité de l'habitat. Depuis 45 ans, elle œuvre à trouver des solutions pour améliorer la qualité des logements en France. Elle mène des programmes de recherche dans tous les domaines qui contribuent à cette qualité, en adéquation avec les attentes des habitants d'aujourd'hui : acoustique, thermique, ventilation, fonctionnalité, environnement, ... Pour viser un habitat meilleur, l'association QUALITEL s'appuie aujourd'hui sur ses différentes filiales pour porter ses activités d'information du public, d'évaluation et d'expertise, de formation professionnelle, de certification de logements et de soutien aux structures œuvrant pour le logement des plus défavorisés.

Filiale du CSTB depuis 2002, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel exploite la soufflerie d'Auteuil, conçue en 1912 par Gustave Eiffel et classée Monument Historique. En s'appuyant sur cette expérience, Aérodynamique Eiffel mène des essais pour différents secteurs : automobile, construction, environnement et aéronautique industrielle.

L'air intérieur étant plus pollué que l'air extérieur, l'association QUALITEL a placé la santé et la qualité de l'air intérieur comme l'une de ses priorités afin de contribuer à l'amélioration de la qualité de vie des occupants au sein de leur logement. Depuis de nombreuses années, l'Association mène ainsi des programmes de recherche sur la ventilation, les émissions de COV, l'amiante, la prédiction de la qualité de l'air intérieur (QAI) en conception.



Selon le Baromètre Qualitel, enquête réalisée chaque année pour mesurer le niveau et les motifs de satisfaction des Français dans leur logement, un français sur cinq (21 %) se plaint d'une mauvaise aération/ventilation dans son logement. Ce chiffre passe à 27 % lorsqu'il s'agit de bâtiment construit entre 1900 et 1980, c'est-à-dire avant la réglementation de 1982 qui impose des exigences en termes de débit d'air extrait afin de favoriser le renouvellement d'air dans les logements, contre 10 % dans les bâtiments récents (moins de 10 ans).

Depuis 1982, la réglementation n'a pas évolué sur ce sujet.

Parallèlement, les bâtiments construits depuis 2012 ont une isolation thermique renforcée pour réduire les consommations énergétiques et ont par conséquent une enveloppe plus étanche où les fuites d'air sont réduites. Cela crée des logements où l'air est potentiellement plus confiné. On constate dans de nombreux logements que les débits aux bouches d'extraction ne respectent pas les exigences réglementaires. La nécessité de renouveler l'air des logements grâce à une ventilation efficace devient pourtant primordiale.

La qualité de l'air intérieur repose d'une part sur le fait de limiter les sources de pollutions et d'autre part sur un renouvellement de l'air assuré par une ventilation efficace. Ce renouvellement d'air, des pièces de vie vers les pièces humides, doit permettre d'évacuer l'humidité et les polluants présents dans l'air.

Depuis de nombreuses années, l'association QUALITEL recommande d'entretenir régulièrement son système de ventilation et de le compléter par une ouverture quotidienne des fenêtres : au minimum 10 minutes 3 fois par jour en créant un courant d'air si possible.

Mais comment l'air circule-t-il vraiment dans une pièce et dans un logement ? Existe-t-il des zones « mortes » où le CO<sub>2</sub> et les polluants de l'air pourraient stagner ? Que peut-on recommander en termes d'aération naturelle, d'emplacement pour les entrées et bouches d'extraction d'air, pour les équipements (chauffage notamment) et le mobilier ? Quel rôle joue le détalonnage de porte sur une bonne ventilation ? Que peut-on conseiller en ce qui concerne l'entretien du système de ventilation ?

Afin de répondre à ces questions, QUALITEL a fait appel au Laboratoire Aérodynamique Eiffel pour mener plusieurs programmes de recherche sur la ventilation des logements.

Ce rapport a pour objectif de présenter les différentes études menées entre 2014 et 2019. Elles visent à démontrer de façon scientifique le bien fondé de certaines recommandations faites autour de la qualité de l'air intérieur dans les référentiels de certification du Groupe QUALITEL, ou de les faire évoluer. Dans un contexte où la rénovation du parc existant est un enjeu national prioritaire, ce dossier expose des points de vigilance pour assurer une bonne ventilation du logement.

Les études successives ont porté sur différents aspects :

- Comment l'air circule-t-il dans une pièce ?
- Comment le CO<sub>2</sub> se diffuse-t-il dans une pièce ? quel est l'impact de la présence d'une, puis de deux personnes ?
- Quel est l'impact du détalonnage de porte sur la circulation de l'air dans le logement ?
- Quels sont les effets de l'encrassement d'un système de ventilation mécanique ? et y a-t-il un impact sur l'isolation acoustique ?

## CONTEXTE & RAPPEL REGLEMENTAIRE

La ventilation est déterminante pour assurer le bien-être et le confort des occupants, la santé, et la préservation du bâti. Elle a un effet direct sur la température de l'air, sur l'humidité relative et sur la qualité de l'air respiré.

### 1. Réglementation sur la ventilation des logements

- Le décret du 22 octobre 1955 et l'arrêté du 14 novembre 1958 relatif à l'aération des logements neufs ont introduit le principe d'aération par pièce. Cette aération peut être réalisée soit par ouverture des fenêtres, soit de façon permanente (au moyen de grilles d'aération ou d'un système de ventilation).
- L'arrêté du 22 octobre 1969 relatif à l'aération des logements neufs a fixé le principe de la ventilation générale et permanente des logements, par ventilation naturelle par conduits à tirage naturel ou par ventilation mécanique. Dans les deux cas, les pièces principales doivent comporter des entrées d'air, et l'évacuation de l'air se fait dans les pièces humides ou de « service » (cuisine, salles de bain, toilettes), l'air devant pouvoir circuler librement des pièces principales vers les pièces de service.
- Pour les logements construits après 1982, 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 afin que les taux de pollution de l'air intérieur du local ne constituent aucun danger pour la santé et que les condensations puissent être évitées ». Il fixe des exigences de débits extraits en pièce de service exprimés en mètres cubes par heure, en fonction du nombre de pièces des habitations et de leur affectation dans les conditions climatiques moyennes d'hiver et des exigences de débit extrait minimum en cuisine et minimum dans l'ensemble du logement (en m<sup>3</sup>/h)

Les normes constructives sont en constante évolution, les bâtiments sont plus étanches, en lien avec l'amélioration de l'isolation thermique, mais la réglementation sur les débits d'air neuf (0,5 vol/h) n'a pas évolué depuis 1982. La ventilation des locaux est un sujet prépondérant au vu de sa contribution à l'évacuation des substances polluantes.

### 2. Qu'en est-il sur le terrain ?

Pour que le renouvellement d'air soit efficace, il est essentiel de respecter un ensemble de règles de bonne mise en œuvre : présence et dimensionnement des entrées d'air, détalonnage des portes, extractions dans les pièces de services, évacuations non obturées, etc. Pourtant, des études réalisées dans des logements démontrent que ce n'est pas toujours le cas.

Le renouvellement d'air des logements varie de 0,23 à 1,21 (vol/h) en Europe [source CE et JRC].

Selon une étude de l'OQAI datant de 2009, la comparaison des débits d'air extraits mesurés dans les logements avec des valeurs de référence montre que 56 % des 104 logements instrumentés ont un débit total minimal strictement inférieur au débit réglementaire.<sup>1</sup>

L'analyse des installations de VMC en certification sur la période 2014-2016, réalisée par CERQUAL Qualitel Certification confirme que la ventilation simple flux hygroréglable de type B est privilégiée pour presque toutes les opérations de construction neuve, la ventilation double flux étant présente dans un peu moins de 1 % des opérations.

---

<sup>1</sup> [http://www.oqai.fr/userdata/documents/296\\_OQAI\\_CNL\\_Etat\\_de\\_la\\_ventilation\\_2009\\_037.pdf](http://www.oqai.fr/userdata/documents/296_OQAI_CNL_Etat_de_la_ventilation_2009_037.pdf)

Dans le cadre du processus de certification, un certain nombre de non-conformités ont été constatées visuellement lors des contrôles, parmi lesquelles :

- entrées d'air et bouches d'extraction différentes du référencement de l'avis technique ;
- entrées d'air dans les pièces principales en nombre insuffisant ;
- présence d'une entrée d'air en salle de bains ou salles d'eau ;
- bouches d'extraction non conformes à la dernière étude thermique validée ;
- problème de détalonnage de porte des chambres des logements ;
- bouche d'extraction installée en cuisine mal calibrée ;
- entrées d'air autoréglables posées en lieu et place d'entrées d'air hygroréglables ;
- accessibilité difficile de la bouche d'extraction d'air située dans la cuisine pour activer le grand débit.

### 3. Quel est l'impact sanitaire pour l'occupant ?

De multiples « polluants » sont présents dans l'air intérieur, c'est-à-dire des composés que l'on ne perçoit pas nécessairement mais qui vont affecter le confort voire la santé des occupants d'un logement. Les principaux polluants sont les particules et les composés organiques volatils (COV), mais on compte aussi les moisissures et les acariens par exemple. Les sources de ces polluants sont multiples : pollution provenant de l'extérieur, polluants liés au bâtiment, aux produits utilisés dans les logements ou issus de nos comportements. Une bonne ventilation vise à réduire leur présence dans les logements. Le choix des produits utilisés est également déterminant.

L'arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction (en contact avec l'air) sur leurs émissions de dix polluants volatils a mis en place une « étiquette sanitaire ». Cette étiquette, qui va de la classe C (la plus émissive) à A+, correspond à des seuils limites de concentration dans l'air pour chaque COV. Elle s'applique aux produits destinés, exclusivement ou non, à un usage intérieur : revêtements de sol, mur ou plafond, cloisons et faux plafonds, produits d'isolation, portes et fenêtres, produits destinés à la pose ou à la préparation des produits.



# **PARTIE 1 :** **COMMENT FONCTIONNE LA VENTILATION D'UN LOGEMENT ?**

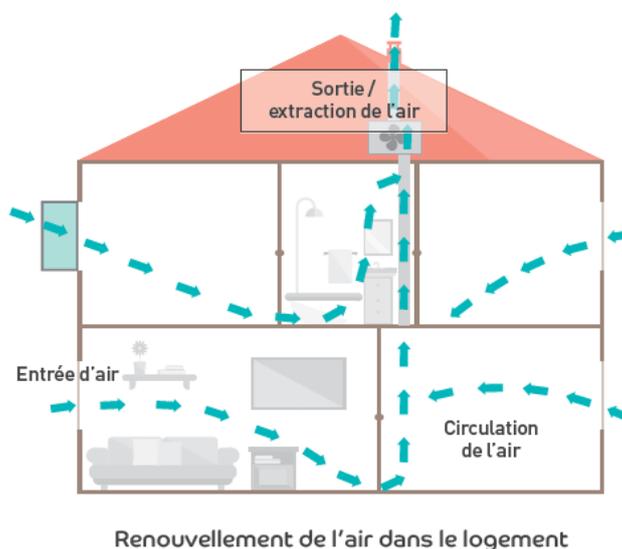
## **1. Principe**

Les besoins d'aération dépendent :

- de l'occupation du logement,
- du style de vie (activités quotidiennes, cuisine, ménage, bricolage, tabac, présence d'animaux...),
- de la température de chauffage et du taux d'humidité du logement,
- des caractéristiques de l'air extérieur (température, humidité, trafic routier, proximité d'une usine ou de végétation...),
- de la présence de certains appareils à combustion,
- du mobilier et des produits de construction et de décoration.

Face à ces différentes sources de pollutions intérieures et extérieures, la ventilation a pour objectif de remplacer l'air « vicié » par de l'air « neuf ». Les principes de ventilation sont basés sur l'entrée de l'air, sa circulation à travers le logement et son extraction : l'entrée d'air est située dans les pièces principales ou pièces de vie (chambres, séjour) et l'air vicié est extrait des pièces humides ou « de service » (cuisine, salle de bains, WC).

L'implantation des entrées d'air et des bouches d'extraction doit assurer une bonne circulation de l'air dans le logement. Une mauvaise disposition ainsi qu'un dimensionnement incorrect des différentes bouches peut entraîner la création de zones « mortes » où les polluants peuvent s'accumuler, une évacuation insuffisante de l'air vicié et donc une dégradation de la qualité de l'air intérieur.



## **2. Systèmes de ventilation**

Depuis 1969, la ventilation générale permanente est obligatoire dans tous les logements collectifs.

**La ventilation naturelle** est un système de ventilation permettant de renouveler l'air intérieur des bâtiments en s'appuyant sur l'action du vent et sur l'écart de température entre l'air extérieur et l'air intérieur (principe du tirage thermique). Ce système est constitué d'une entrée d'air dans chaque pièce principale et d'une extraction d'air par conduit vertical dans chaque pièce humide. Ce système est largement utilisé en France dans le résidentiel collectif construit avant 1982.

**La ventilation mécanique contrôlée (VMC) simple flux** constitue le système de base de la réglementation en matière de ventilation des logements en France. Son principe de fonctionnement : des entrées d'air sont placées dans des pièces principales, l'air transite des pièces principales vers les pièces humides en passant sous les portes intérieures, les bouches d'extraction sont installées dans les pièces humides. Les grilles d'extraction sont raccordées grâce à un réseau de gaines à un caisson d'extraction centralisé motorisé.

La VMC simple flux peut être :

- autoréglable : les débits d'air sont constants, peu importe les conditions climatiques extérieures (vent, pluie) ;
- hygroréglable : les débits d'air varient selon le taux d'humidité intérieure, ce qui permet d'évacuer rapidement un air trop humide :
  - de type A : le système vérifie le taux d'humidité à l'extraction,
  - de type B : le système vérifie le taux d'humidité à l'aspiration et à l'extraction.

**La VMC double flux** : l'introduction de l'air ainsi que son extraction sont assurées par des dispositifs mécaniques. Des bouches d'insufflation sont disposées dans les pièces principales et des bouches d'extraction dans les pièces de service. La VMC double flux est composée de deux ventilateurs indépendants avec deux réseaux de conduits séparés, l'un pour insuffler l'air neuf dans les pièces principales et l'autre pour extraire l'air vicié dans les pièces de service. Le caisson d'extraction récupère la chaleur de l'air vicié pour réchauffer l'air neuf qui est insufflé dans le logement.

### 3. Eléments constitutifs du système de ventilation

#### Entrées d'air :

Elles sont disposées dans les pièces principales au niveau des fenêtres, dans le coffre de volet roulant ou en traversée de mur. Elles sont localisées en partie haute de la pièce, à une hauteur d'au moins 1,80 m afin d'éviter les courants d'air gênants. La circulation de l'air depuis les pièces principales jusqu'aux pièces de service est permise par le détalonnage des portes intérieures : 1 cm pour les portes desservant les pièces principales, une salle d'eau ou la cuisine (si celle-ci comporte 2 accès) et 2 cm pour les portes desservant une cuisine qui ne comporte qu'un accès. La conception et le dimensionnement des entrées d'air (type, nombre, emplacement...) sont réalisés conformément au NF DTU 68.3 pour la VMC autoréglable simple flux et aux Avis Techniques pour la VMC hygroréglable.

#### Filtres :

Des filtres sont installés dans les entrées d'air pour capter les polluants présents dans l'air extérieur. Ils permettent ainsi de protéger les composants du système de ventilation de l'encrassement créé par la pollution atmosphérique. Les filtres sont classés selon leur capacité à retenir les particules fines, moyennes et grosses.

#### Bouche d'extraction :

Elément indispensable de fonctionnement d'une VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée), placé dans des pièces souvent humides de type cuisine, salle de bain ou encore WC. Son rôle est d'évacuer les polluants présents à l'intérieur de ces espaces. Une bouche d'extraction est associée à des entrées d'air placées dans les pièces principales permettant le renouvellement d'air grâce à l'introduction d'air neuf. Concernant la disposition des bouches, elles doivent être : distantes de minimum 10 cm des angles et parois, accessibles, équipées d'un cordon permettant de les commander et démontables afin de pouvoir en effectuer le nettoyage et l'entretien.

### **Caisson d'extraction :**

Caisson équipé d'un ensemble aéraulique (moteur, ventilateur, plots anti-vibratiles) et d'une enveloppe en acier ou en matière composite pour isoler du bruit.

### **Conduits ou réseaux aérauliques :**

Gaines reliant le ventilateur au logement et à l'extérieur. Ils véhiculent :

- De l'air « hygiénique » ou « neuf » : air aspiré, air insufflé
- De l'air « vicié » : air extrait des locaux, contenant de l'humidité et des polluants
- De l'air « traité » : air chaud, froid, humidifié, déshumidifié, filtré, désinfecté, etc.

Souples, rigides ou semi-rigides, ils peuvent être de différentes formes (cylindriques, rectangulaires, oblong...) et en différents matériaux. Les conduits sont classés de A à D selon leur étanchéité, D étant la meilleure classe.

### **Ventilateurs :**

Situés dans les entrées d'air et les bouches d'extraction, les ventilateurs aspirent ou propulsent l'air dans les pièces du logement. Axiaux/hélicoïdes ou centrifuges, on règle leur débit et on peut ainsi créer des différences de pression.

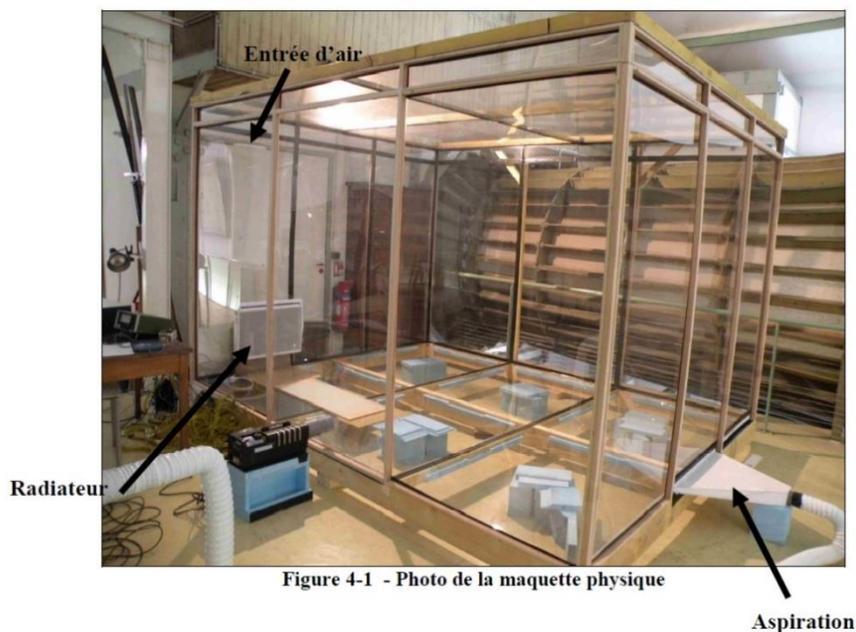
## **PARTIE 2 :** **COMMENT L'AIR CIRCULE-T-IL DANS UNE PIECE ?**

**Objectif :** Comprendre la diffusion de l'air dans une pièce pour savoir comment bien positionner les entrées d'air, les bouches d'extraction et les radiateurs, afin d'assurer une bonne qualité de l'air.

La ventilation d'un logement repose sur un principe de circulation de l'air, de pièces où de l'air « neuf » entre, vers des pièces où l'air « vicié » est extrait. Les déplacements de l'air dans le logement sont donc liés au système de ventilation installé, à l'emplacement des entrées d'air et des bouches d'extraction, mais aussi à la taille du logement, son occupation, ses meubles, à l'espace laissé sous les portes... L'Association QUALITEL a fait appel au Laboratoire Aérodynamique Eiffel pour étudier la circulation de l'air dans une pièce et ainsi déterminer où positionner les entrées et sorties d'air, tout comme un radiateur. Différents tests ont été réalisés dans une pièce témoin grandeur réelle : études physiques complétées par des simulations numériques.

### **1. Présentation de la Maquette**

Des études physiques ont été menées dans une pièce-laboratoire permettant de représenter une chambre d'un logement.



### **2. Caractéristiques**

- Pièce, de type chambre, taille réelle de 10 m<sup>2</sup>, de 2,75m x 3,65m x 2,2m, comprenant une fenêtre extérieure intégrant une fente pour l'admission d'air neuf, une porte intérieure avec un détalonnage de 2 cm assurant la sortie d'air, et un radiateur électrique de 1 000 Watts.
- Taux de renouvellement d'air de 0,5 volume par heure (correspond à l'exigence réglementaire).
- Différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la pièce : 10°C maximum.
- Entrée d'air positionnée à 20 cm du plafond et réglée selon le débit d'air choisi.
- Sortie d'air (2cm\*80cm) positionnée au sol de la pièce au milieu de la paroi, reliée à un système d'aspiration permettant de régler le débit d'aspiration.

- Dans certaines configurations, une isolation installée sur chaque paroi de la pièce-laboratoire (plaque de polystyrène de 20 mm d'épaisseur et positionnées à 10 mm à l'extérieur des parois). Les murs sans isolant ont un coefficient de transfert thermique  $U = 5,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Les parois avec isolant ont un coefficient de  $1,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Le sol et le plafond ont respectivement  $U = 1,12$  et  $1,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

***Ventilateur relié à la sortie d'air et isolation installée sur chacune des parois de la pièce, constituée d'une plaque de polystyrène de 20 mm d'épaisseur et positionnées à 10 mm à l'extérieur des parois en plexi :***



Des thermocouples sont répartis régulièrement dans la pièce et sont reliés à une centrale d'acquisition puis à un PC. La programmation pour l'acquisition des données a été réalisée avec le logiciel LabView. Les données instantanées sont moyennées toutes les 15 s durant toute la période de mesure. La période d'essais est variable en fonction de la configuration (temps moyen d'essai 3h). Les données sont ensuite traitées à l'aide du logiciel Excel en langage Visual Basic. Ci-dessous la photo du banc d'installation :

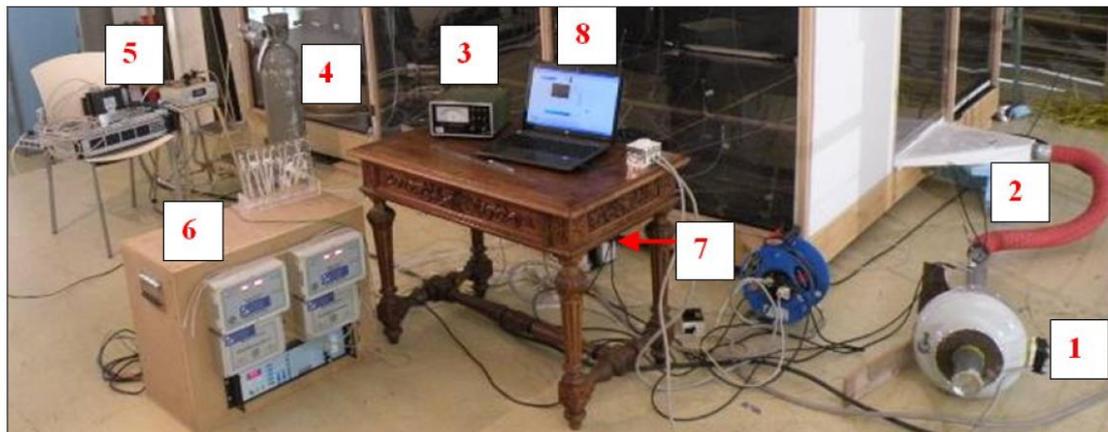


Figure 5 Banc d'installation - 1 - Ventilateur, 2 - tube de Pitot et la prise n° 20, 3 - Micro-manomètre, 4 - Bouteille de CO<sub>2</sub> (pureté = 99,995%), 5 - Régulateur de débits et débitmètre, 6 - les deux Analyseurs de CO<sub>2</sub>, 7 - Châssis d'acquisition, 8 - PC d'acquisition.

### 3. Etude de faisabilité

L'objectif de l'étude de faisabilité était de mettre au point, sur une maquette à échelle réduite, une technique de modélisations des courants fluides à l'intérieur d'une pièce. Il s'agissait de comprendre l'organisation complexe des flux d'irrigation et leur mécanisme de fonctionnement.

Dans ce cadre, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a procédé à différentes étapes préalables :

- réflexion sur les modélisations du phénomène de diffusion de l'air ;
- étude de similitude pour des essais sur maquette à échelle réduite ;
- conception et fabrication d'une pièce-laboratoire à échelle 1 ;
- développement de méthodes de mesures quantitatives et qualitatives ;
- comparaison du fonctionnement de la ventilation pour plusieurs configurations.

L'étude de faisabilité a permis de déterminer les techniques permettant d'analyser la circulation de l'air dans la pièce. Une des principales difficultés de la visualisation des déplacements de l'air ou « écoulements » à l'échelle réelle est liée au fait que les vitesses de débit d'air sont très faibles. En effet, un renouvellement d'air de 0,5 volume/heure (soit environ 11 m<sup>3</sup>/h) correspond à une vitesse moyenne de 0,5 mm/s dans la pièce. Différentes techniques de mesures et de visualisations ont donc été testées : la visualisation à la fumée et la mesure de la température ont été retenues.

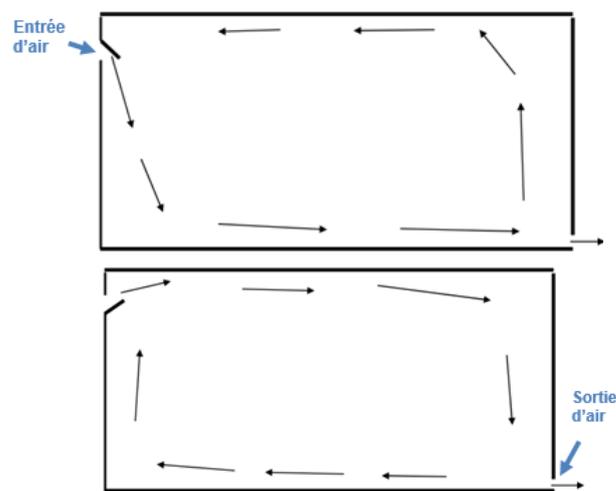
#### 3.1. Visualisation à la fumée

Des tests ont été réalisés avec du Carbonate de Magnésium et une lumière noire, des bulles de savon gonflées à l'hélium et des fumigènes de différentes densités. Un générateur de fumée de densité proche de l'air a permis de mettre au point une méthodologie pour visualiser les principaux trajets des flux d'air.

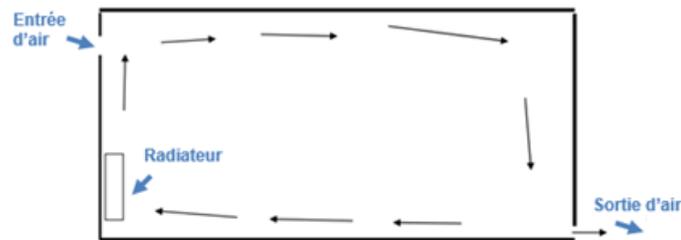
##### Résultats :

- L'absence de mouvement visible près de la sortie (détalonnage porte).
- Des mouvements d'air lents mais perceptibles visuellement près du sol et du plafond.
- Une fumée qui se diffuse très lentement pour remplir l'intégralité du volume de la pièce (une fois la pièce totalement opaque, il devient très difficile de distinguer le moindre mouvement).

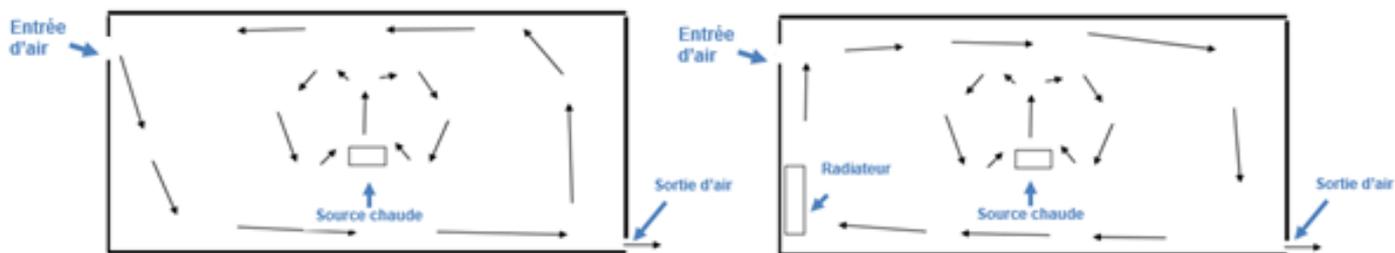
##### Schémas représentant les flux d'air dans la pièce – Aérodynamique Eiffel :



L'orientation de l'entrée d'air conditionne le sens de la circulation de l'air à l'intérieur de la pièce. Les mouvements d'air ne sont pas perceptibles au centre de la pièce.



Lorsqu'on ajoute un radiateur, on constate que le chauffage est le moteur des circuits aérauliques dans la pièce, quelle que soit l'orientation de l'entrée d'air.



Lorsqu'on ajoute une « source chaude » (lampe à incandescence de 250 W), cela provoque des mouvements d'air convectifs au centre de la pièce, et donc un brassage d'air qui ne modifie pas le système aéraulique constaté avec et sans chauffage par un radiateur.

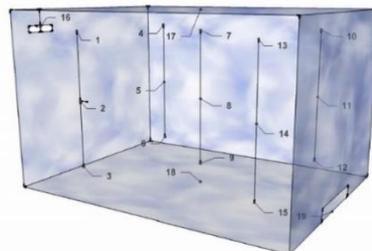
### 3.2. Mesure des températures

En complément de la visualisation, une vingtaine de thermocouples ont été installés dans la maquette pour mesurer la température de l'air ainsi que la température des parois. Cette mesure permet de quantifier le système de ventilation mais aussi de comparer les différents critères tels que :

- l'isolation de la pièce,
- le taux de renouvellement d'air,
- l'implantation du radiateur,
- l'implantation de la porte (sortie d'air),
- la mise en place d'une paroi intérieure,
- la différence de température entre l'air extérieur et la consigne de chauffe,
- une autre source chaude.

#### **Schéma d'implantation des sondes de température (thermocouples) – Aérodynamique Eiffel :**

*Positionnement des thermocouples : les prises 1 à 15 sont réparties sur 5 axes verticaux. Les prises basses (3-6-9-12-15) sont à 25 cm du sol, les prises hautes (1-4-7-10-13) à 25 cm du plafond et les autres prises (2-5-8-11-14) au centre de la pièce.*



Les mesures ont été réalisées en continu dès le réglage du débit de ventilation et après la mise en route du radiateur. Les mesures de chaque sonde étaient moyennées toutes les 10 secondes et pendant une période comprise entre 1h30 et 4h30 en fonction du temps nécessaire à la stabilisation des mesures.

### 3.3. Conclusions

- Le gradient de température : à l'équilibre on observe un gradient de température dans la pièce avec ou sans isolation, les températures relevées en bas de la pièce étant inférieures de 10% à la valeur moyenne de la pièce et en haut supérieur d'environ 10%. Les températures des parois restent inférieures à la valeur moyenne de la pièce.
- La stratification des températures : pour la quasi-totalité des configurations testées, on observe une uniformité des températures à une hauteur donnée, quelle que soit la position dans la pièce.
- La montée en température semble la même pour toutes les sondes à une même hauteur. De même, sur une verticale les sondes atteignent simultanément leurs valeurs d'équilibre.
- La température de sortie d'air : la sortie se situant en bas d'une paroi, la température de sortie reste basse, proche de la température du sol.
- L'isolation des parois diminue l'écart de température entre le bas et le haut de la pièce (écart ramené de 13% à 10% par rapport à la valeur moyenne).
- Le taux de renouvellement d'air : son augmentation homogénéise un peu les températures dans la pièce, mais ne modifie pas le temps nécessaire à la stabilisation des températures.
- L'emplacement du radiateur : les températures près de la source de chaleur varient en fonction de la hauteur. La position du radiateur dans la pièce semble avoir de l'importance et devra être étudiée.

Les essais ont permis de visualiser les flux internes, de comprendre l'influence de certains paramètres et la prépondérance des phénomènes thermiques sur l'organisation des flux dans la pièce. L'étude de faisabilité a démontré que les circulations aérauliques peuvent être étudiées par visualisation à la fumée ainsi que par des mesures de températures de l'air et des parois via des thermocouples.

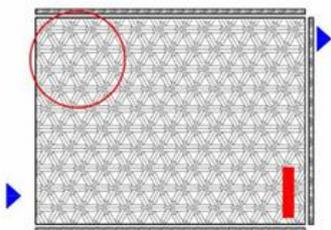
## 4. Etude paramétrique sur la maquette

Compte-tenu de la difficulté à visualiser les déplacements d'air dans la pièce, la technique par mesures des températures a été retenue pour la suite des essais. Les thermocouples permettent de définir les zones où il y a un brassage d'air. Ainsi 49 thermocouples ont été installés et régulièrement répartis dans la maquette. L'impact des effets thermiques sur les mouvements d'air a été mis en avant lors de l'étude de faisabilité. En effet, c'est le radiateur qui produit dans la pièce des mouvements aérauliques non négligeables. Par ailleurs, les zones qui restent « froides » ne sont pas soumises à la dynamique convective du radiateur.

### 4.1. Les configurations testées

Paramètres de base de l'ensemble des configurations :

- l'air entre dans la pièce-laboratoire avec un taux de renouvellement de 0,5 volume/heure,
- la température de l'air entrant se situe aux alentours de 12°C.
- Pour rappel, l'air entrant n'est pas soufflé mais est aspiré par un groupe moto-ventilateur permettant de régler le débit d'aspiration ou le nombre de renouvellement d'air par heure.
- Le radiateur diffuse une température de consigne paramétrée de la manière suivante :  
 $T_{\text{consigne}} = \text{Température de l'air extérieur} + 10^{\circ}\text{C}$ .



#### Légende :

- les triangles bleus représentent l'entrée et la sortie d'air
- le rectangle rouge symbolise l'emplacement du radiateur
- le rond rouge représente une zone « morte »
- les rectangles gris à l'extérieur représente l'isolant

#### Paramètres variables testés :

- La position relative de l'entrée d'air, de la sortie d'air et du dispositif de chauffage : configurations 2 à 11 ;
- Le débit d'aspiration : configurations 11 à 13 ;
- L'isolation des parois (niveau d'isolation, plusieurs parois non isolés) : configurations 14 à 17 ;
- La mise en place de « brasseurs d'air » : configurations 18a à 19d ;
- Le déplacement de l'entrée d'air : configuration 20 ;
- Le mobilier : configurations 21 et 22 ;
- La présence et l'activité humaine : configuration 23.

#### Liste des paramètres des configurations testées :

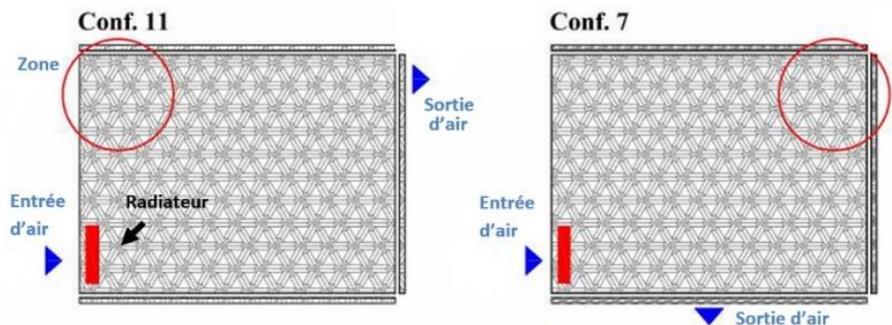
Nom confie	Temp extérieure	Consigne radiateur (°C)	Position radiateur	Position bouche sortie (x, y, z)	Q (vol/h)	ouverture entrée	isolation et autre
Conf 1	12,5	22,5	0 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 2	13	23	0 - 2,7 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 2	14	24	0 - 2,7 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 3	13,5	23	1,8 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 4	13	23	3,6 0 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 5	13	24	0 - 2,7 - 0	1,8 - 0 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 6	13	23	1,8 - 0 - 0	1,8 - 0 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 7	12	22	0 - 0 - 0	1,8 - 0 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 8	11	21	1,8 - 2,7 - 0	1,8 - 0 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 9	12	22	3,6 0 0	1,8 - 0 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 10	10,5	20,5	0 - 2,7 - 0	1,8 - 0 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 11	13	23	0 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,072 m	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 12	12	22	0 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	7,4 Vol/h	6 barrettes ouvertes (tout)	tout isolé sauf mur entrée d'air
Conf 13	12,5	22,5	0 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	3,6 Vol/h	3 barrettes ouvertes (celles du haut)	
Conf 14	12,5	22,5	0 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	Pas d'isolation façade : porte amovible et entrée
Conf 15	12,5	22,5	0 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	Pas d'isolation façades : de la porte amovible, de l'entrée et sortie
Conf 16	14	24	0 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	Seulement plafond et sol isolés
Conf 17	13	23	0 - 0 - 0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	Seulement sol isolé
Conf 18 a	12,5	22,5	0-0-0	3,6 - 2,7 - 1	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	conf 1 + ventilateur h=0,55m 6v (0,13 m3/s)
Conf 18 b	12,5	22,5	0-0-1	3,6 - 2,7 - 2	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	conf 1 + ventilateur eteint
Conf 18 c	12,5	22,5	0-0-2	3,6 - 2,7 - 3	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	conf 1 + ventilateur h=0,55m 6 v (0,13 m3/s)
Conf 18 d	12,5	22,5	0-0-3	3,6 - 2,7 - 4	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	conf 1 + ventilateur h=0,55m 12 v (0,026 m3/s)
Conf 19 a	12	22	0-0-0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	conf 1 + ventilateur h=0 m 6v (0,13 m3/s)
Conf 19 b	12	22	0-0-0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	conf 1 + ventilateur eteint
Conf 19 c	12	22	0-0-0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	conf 1 + ventilateur h=0 m 6 v (0,13 m3/s)
Conf 19 d	12	22	0-0-0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	conf 1 + ventilateur h=0 m 12 v (0,026 m3/s)
Conf 20	11	22	0-0-0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a au centre h=2,095 m	isolant conf 1
Conf 21	15	25	0-0-0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	isolant conf 1 / armoire / lit
Conf 22	13	23	0-2,7-0	3,6 - 2,7 - 0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	isolant conf 1 / armoire / lit
Conf 23	12	22	0-0-0	3,6-2,7-0	0,6 Vol/h	1/2 a gauche(vue exterieur) h=2,095 m	Armoire + présence humaine. Pas d'isolation façade entrée et sur 2/3 porte amovible

## 4.2. Impact du positionnement de l'entrée d'air, de la sortie d'air et du dispositif de chauffage

Les configurations 2 à 11 de la maquette ont pour objet de représenter les différents essais physiques réalisés par Aérodynamique Eiffel afin d'évaluer l'influence des positions des bouches d'entrée et de sortie d'air ainsi que du radiateur sur la diffusion de l'air.

### a. Identification de zones mortes

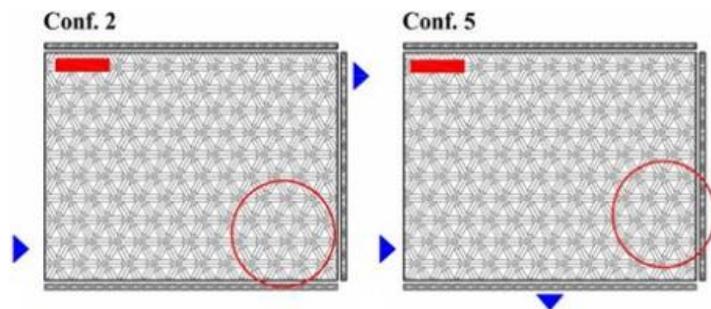
Dans les configurations 11 et 7, la sortie d'air a été déplacée et le radiateur se situe sous l'entrée d'air.



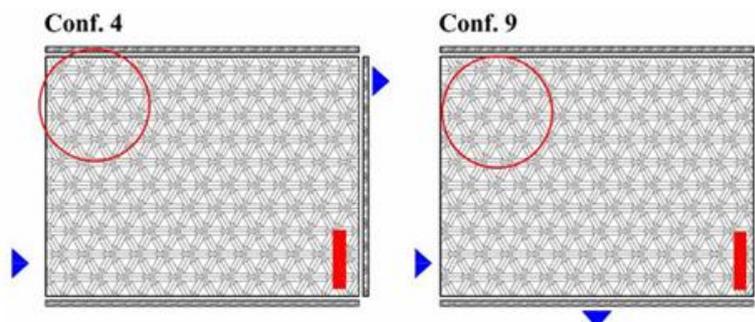
Des zones « mortes » (encadrées en rouge) sont apparues dans les deux cas : les courants aérauliques sont quasiment inexistant dans ces parties de la pièce-laboratoire. Il est donc pertinent de privilégier l'installation de lampes, postes de travail, etc. dans ces zones afin de favoriser les phénomènes de convection, eux-mêmes facteurs d'une bonne diffusion de l'air.

### b. Positionnement de la sortie d'air

La sortie d'air a été déplacée et le radiateur a été placé sur le côté de la pièce dans les configurations 2 et 5, et sur le mur opposé à l'entrée d'air dans les configurations 4 et 9.



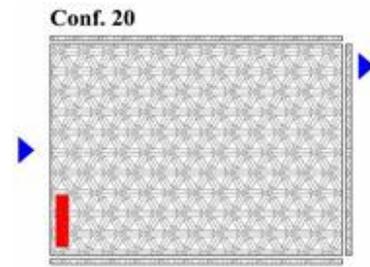
Les zones de stagnation se situent à l'opposé du radiateur dans les deux cas. Pour autant, les températures relevées dans chaque pièce sont quasiment identiques.



Les zones mortes sont apparues dans les angles de la pièce où il n'y avait ni entrée/sortie d'air, ni radiateur.

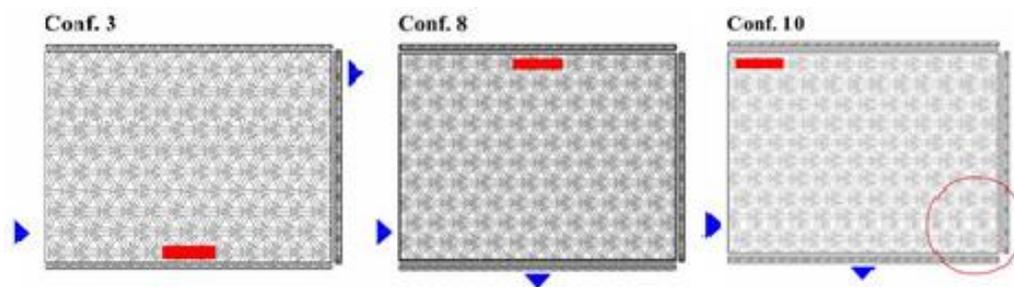
### c. Importance du positionnement de l'entrée d'air

Dans la configuration 20, l'entrée d'air a été déplacée. Avec ce positionnement plus central de l'entrée d'air, un brassage plus homogène est assuré. Aucune zone morte n'est apparue dans cette configuration.



### d. Impact de la position centrale du radiateur

Les configurations 3, 8 et 10 mettent en avant l'impact de la position centrale du radiateur pour éviter la création de zones de stagnation. Lorsque l'entrée d'air et la sortie d'air sont positionnées sur les parois contiguës, le radiateur doit être stratégiquement positionné afin d'éviter la création de zones « mortes ».

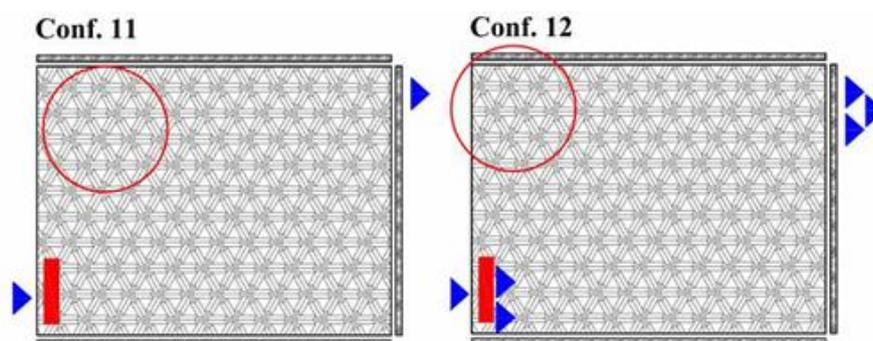


#### Conclusions :

Les variations de positionnement des entrées, sorties d'air et du radiateur modifient les valeurs moyennes de température et révèlent une réelle influence sur la diffusion de l'air. Une configuration inadaptée, comme la proximité des entrées et sorties d'air, peut faire apparaître des zones de stagnation. Il est donc important de **privilégier l'éloignement des bouches de soufflage et d'extraction pour favoriser la diffusion de l'air.**

### 4.3. Variation du débit d'aspiration

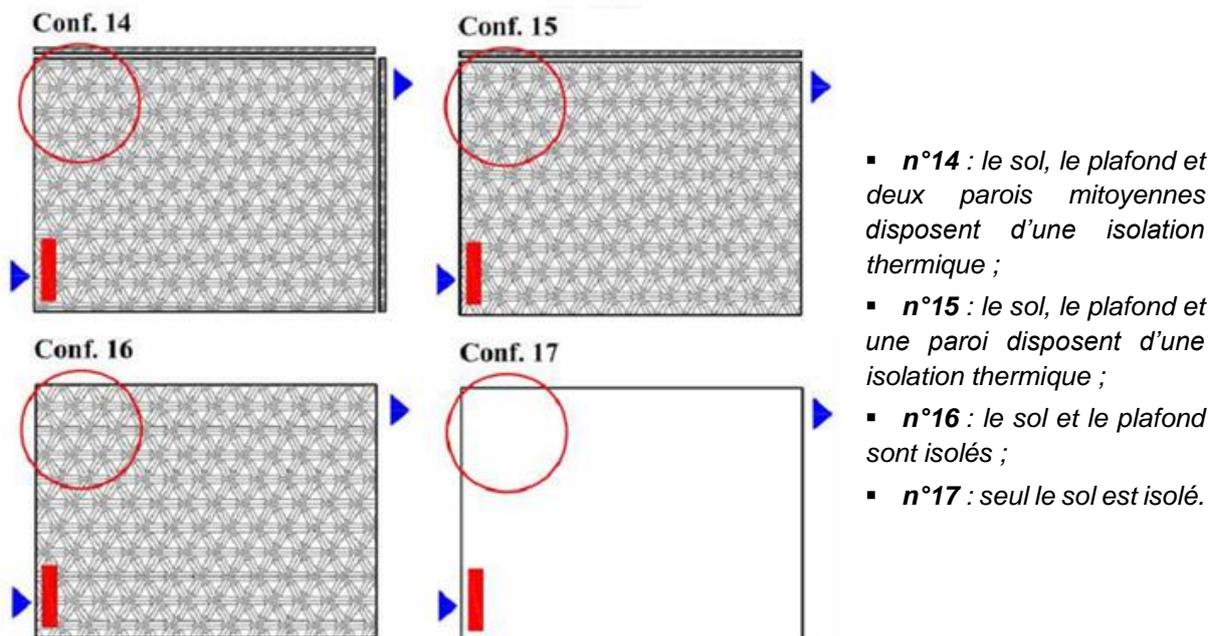
Les configurations 11 à 13 (non représentée ici mais correspond à un débit de 3,6 volume/heure) représentent la maquette après augmentation des vitesses d'entrée et de sortie d'air. L'objectif étant de visualiser l'impact du débit de renouvellement d'air sur la diffusion de l'air dans une pièce.



Lorsque le débit d'aspiration est fortement augmenté, passant de 0,6 à 7,4 volume/heure, le gradient thermique de la pièce est moins marqué. Les températures sont plus homogènes.

#### 4.4. Variation de l'isolation des parois

Les configurations 14 à 17 symbolisent la présence ou l'absence d'isolation sur les parois de la maquette. On cherche à évaluer l'impact de l'isolation sur les mouvements d'air dans la pièce.

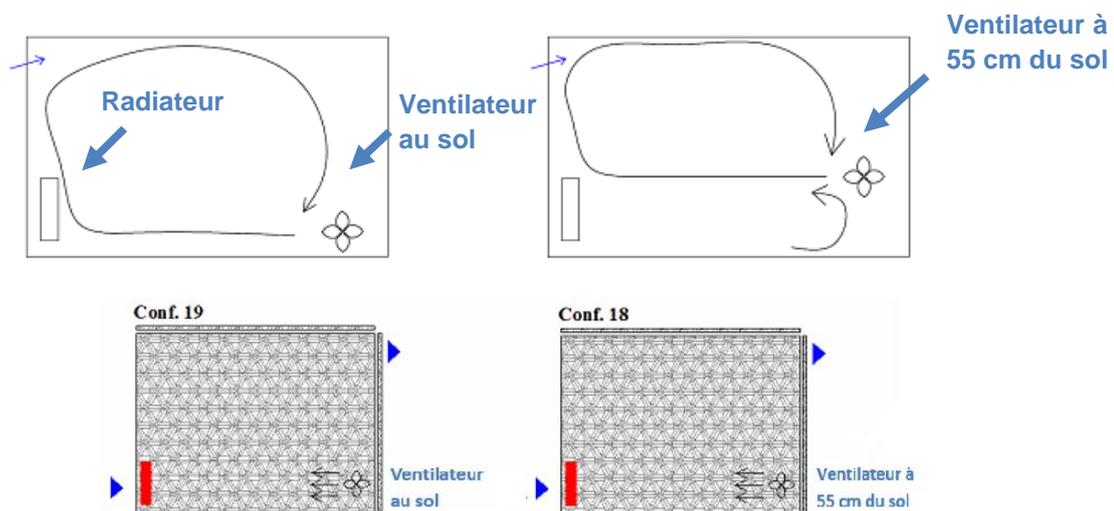


Quelle que soit la paroi isolée, une zone de faible diffusion d'air apparaît. Sur chacune des quatre configurations ci-dessus, cette zone se situe dans un coin de la pièce à l'opposé de l'entrée et de la sortie d'air. Bien qu'ayant un effet non négligeable sur les déperditions thermiques (des températures plus basses sont observées), l'isolation des parois et du sol n'a pas semblé intervenir dans les circuits aérauliques.

Afin d'évaluer l'impact de l'isolation des parois sur les mouvements d'air dans la pièce, certaines configurations ont été testées. Bien qu'ayant un effet non négligeable sur les déperditions thermiques, l'isolation des parois et du sol n'a pas semblé intervenir dans les circuits aérauliques.

#### 4.5. Impact de la mise en place de « brasseurs d'airs »

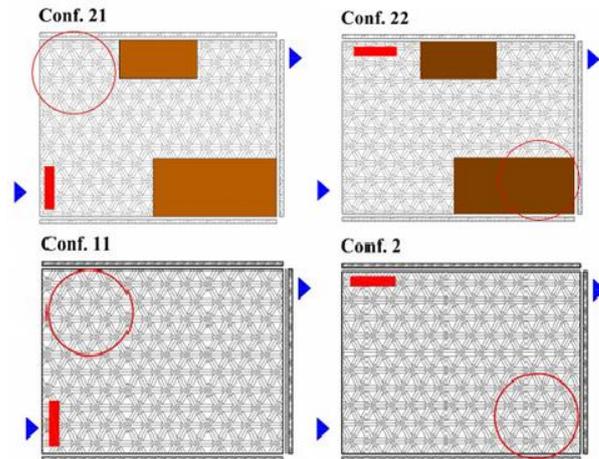
Les configurations 18a à 19d figurent la présence d'un élément de brassage d'air (ventilateur) dans la pièce-laboratoire afin d'étudier son impact sur la diffusion de l'air dans la maquette. Le ventilateur est positionné à deux hauteurs (H ventil) différentes, soit directement au sol, soit à 55 cm du sol. La vitesse de brassage (Q ventil) est également soumise à variation.



Lorsque le ventilateur est en fonctionnement, la stratification thermique habituellement observée disparaît. Un mélange d'air global intervient dans toute la pièce. De plus, plus le brassage d'air est important, plus les températures relevées par les thermocouples sont homogènes mais sont en revanche plus basse que lorsque le brasseur d'air est absent. Il n'est pas apparu de différences en fonction du positionnement en hauteur du ventilateur, seul le circuit aéraulique change.

#### 4.6. Impact de la présence de mobilier

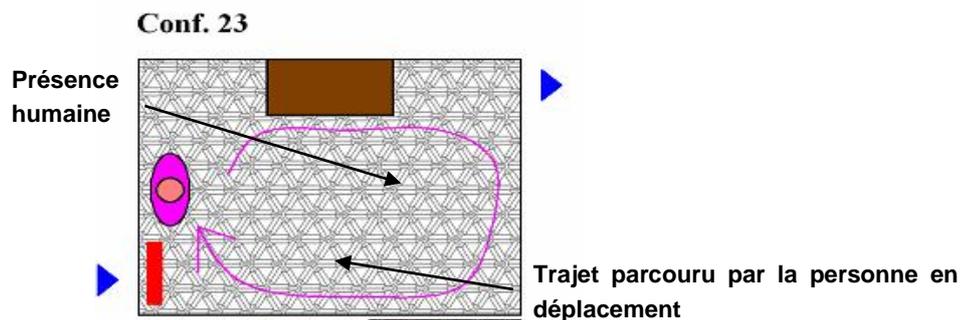
Les configurations 21 et 22 schématisent l'ajout de meubles dans la maquette, afin d'observer l'impact de la présence de mobilier sur la trajectoire de l'air.



La présence de mobilier dans les configurations 21 et 22 n'ont pas affecté les écoulements d'air. Pour comparaison, les schémas 2 et 11 présentaient les mêmes caractéristiques sans mobilier. Les zones mortes identifiées dans les configurations avec et sans mobilier sont les mêmes.

#### 4.7. La présence et l'activité humaine

Afin d'étudier l'impact de la présence humaine sur les écoulements d'air, des essais ont été réalisés avec la présence d'une personne dans la pièce en position statique ou en déplacement.



La zone morte habituellement constatée pour cette configuration a été plus difficile à détecter. Néanmoins, la présence humaine en statique n'a pas modifié les grands équilibres. Le déplacement a entraîné un léger brassage de l'air qui semblait avoir un effet limité dans le temps.

## 4.8. Conclusion de l'étude paramétrique

Cette étude physique a permis de compléter l'étude de faisabilité et de quantifier les effets de différents paramètres sur la ventilation hygiénique d'une pièce.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- La proximité des entrées et sorties d'air (sur le même mur ou sur des murs mitoyens) est à éviter en raison du risque de création de « zones mortes » ;
- L'entrée d'air et le radiateur doivent être proches pour limiter la sensation de froid et ainsi éviter que l'entrée d'air ne soit bouchée par l'occupant ;
- L'augmentation du débit d'air accélère légèrement l'équilibre des températures : influence sur la vitesse de diffusion ;
- L'installation de lampes, postes de travail, etc. dans les zones mortes favorise les phénomènes de convection.

Parmi toutes les configurations testées dans l'étude, il apparaît deux cas de figures à éviter pour limiter l'apparition de zones de stagnation :

- la proximité des entrées et sorties d'air,
- le radiateur positionné sous l'entrée d'air.

La capacité du système de ventilation à balayer l'ensemble de la pièce dépend fortement de l'emplacement des entrées et sorties d'air. Les variations de positionnement de ces éléments modifient les valeurs moyennes de température et révèlent une réelle influence sur la diffusion de l'air. Une configuration inadaptée, comme la proximité des entrées et sorties d'air, peut favoriser l'apparition de zones de stagnation. Il est donc important de privilégier l'éloignement des bouches de soufflage et d'extraction pour favoriser la diffusion de l'air.

**La présence de sources chaudes constitue le principal moteur des écoulements d'air dans la pièce.** Ces sources, selon les observations, sont à l'origine des circuits aérauliques de la pièce. La ventilation repose alors sur le phénomène de convection qui, en créant des courants d'air, met l'air en mouvement sans force mécanique.

La présence humaine ne semble pas impacter significativement la diffusion de l'air dans la pièce. Néanmoins, des études complémentaires seront effectuées notamment via l'analyse de la dispersion du CO<sub>2</sub>.

## 5. Etude de simulations numériques

### 5.1. Contexte

Le laboratoire Aérodynamique Eiffel et le CSTB ont souhaité développer un projet de recherche sur le thème « mise au point de la simulation numérique avec un recalage physique en soufflerie ». Le projet prend en compte la nécessité pour Aérodynamique Eiffel de développer un système interne de réponse à la demande d'études numériques couplées à des mesures physiques.

### 5.2. Objectif

Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de mettre au point un outil de simulation numérique afin de disposer, à terme, d'un outil fiable et utilisable pour étudier plus facilement des paramètres comme la géométrie des pièces ou la diffusion de toute sorte de polluant.

### 5.3. Les essais

Le laboratoire Eiffel a développé la géométrie, le maillage et la visualisation des résultats via la plateforme Salomé, logiciel en open source développé depuis 2000. Le calcul est réalisé par Code Saturne un logiciel de simulation numérique en mécanique des fluides développé depuis 1997 par la division Recherche et Développement d'EDF. La maquette numérique reprend les mêmes caractéristiques que la maquette physique. Le comportement de l'air entrant dans la pièce-laboratoire a été modélisé et la notion de stratification thermique révélée par les sondes de température dans les essais physiques a également pu être visualisée en numérique (cf. captures page suivante).

### 5.4. Méthodologie

La simulation numérique est réalisée grâce à des logiciels : Salomé pour développer la géométrie, le maillage et le poste processing (visualisation des résultats) et le Code Saturne sert au calcul. La maquette numérique a les mêmes dimensions et caractéristiques que la maquette physique (détalonnage, puissance de chauffage, coefficient de transfert thermique, température extérieure, ...).

### 5.5. Mesures

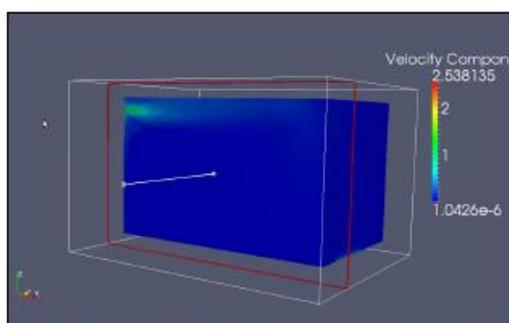
Trois configurations ont été simulées :

- 1 volume/heure de renouvellement d'air sans chauffage (isotherme).
- 0.5 volume/heure de renouvellement d'air sans chauffage (isotherme).
- 0.5 volume/heure de renouvellement d'air avec chauffage (effet thermique).

### 5.6. Résultats

Les résultats des simulations numériques sont très proches des résultats physiques même s'il est difficile de garantir des conditions expérimentales parfaitement identiques.

#### a. Sans chauffage (isotherme)



3-25 Vitesse maximales de 2.53 m/s. Elle est très localisée sur l'ouverture du haut

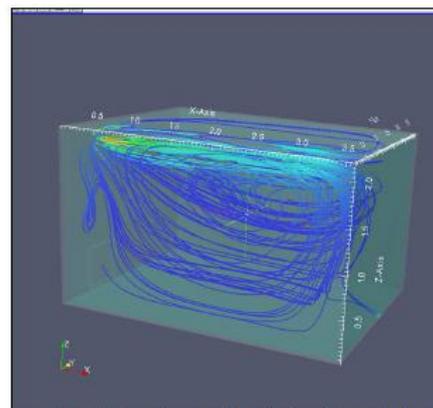
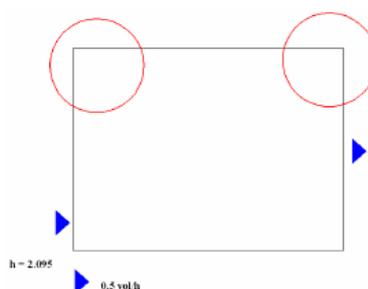


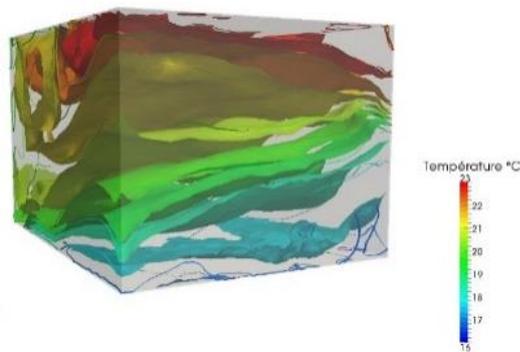
Figure 3-36 Lignes de courants dans la pièce à régime établi



Les circuits aérauliques restent similaires avec un taux de renouvellement d'air compris entre 0,5 ou 1 volume d'air. **Les zones de moindre ventilation sont situées dans les coins de la pièce, d'autant plus si elles sont éloignées des entrées et sorties d'air. Au plafond les vitesses de l'air sont plus importantes, donc les couches hautes sont mieux ventilées.**

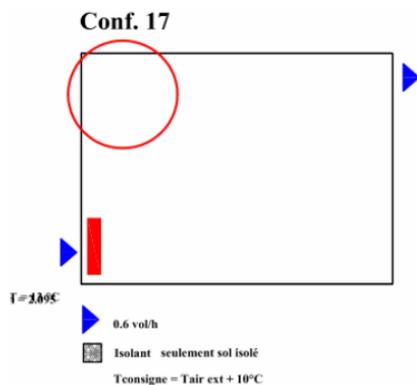
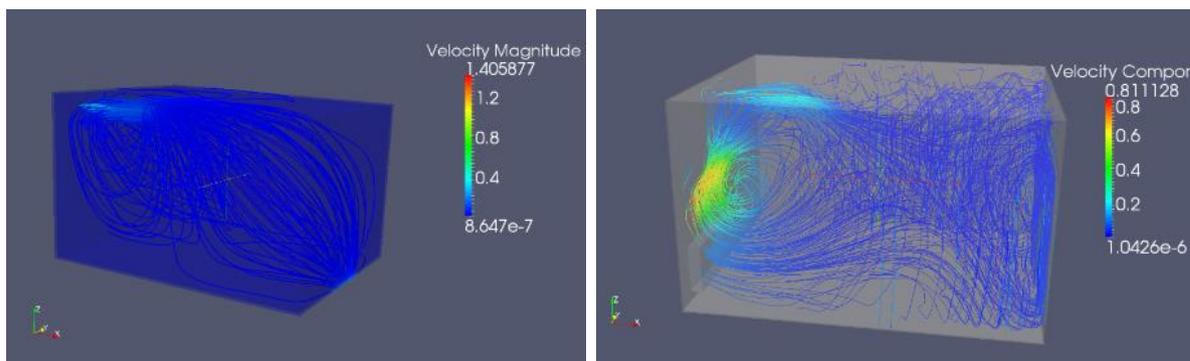
## b. Avec chauffage

**Capture numérique représentant la stratification des températures :**



On constate que l'air chaud monte.

**Lignes de courant dans la pièce et champs de vitesse :**



Le cercle rouge représente la zone la moins ventilée, situé dans un coin de la pièce

**En présence de chauffage, le moteur principal des écoulements dans la pièce est le radiateur** (phénomène déjà observé lors de l'étude paramétrique précédente). Les vitesses générées par l'échauffement de l'air sont beaucoup plus fortes que celles générées par la ventilation. En dehors des flux convectifs observables près du radiateur, seules les vitesses d'air au niveau de la bouche d'entrée sont quantifiables mais leur orientation est très marquée par la présence du radiateur.

## 5.7. Conclusion

L'étude physique a permis à Aérodynamique Eiffel de mettre au point un modèle numérique pour étudier la ventilation hygiénique à l'intérieur d'une pièce. Les résultats obtenus via la pièce-laboratoire ont été utiles au développement de l'outil et à la validation des résultats obtenus. Ils sont d'ailleurs très proches des résultats physiques.

Ainsi les circuits aérauliques internes ont été clairement identifiés et sont comparables à ce qui a pu être observé lors des visualisations par la fumée (étude paramétrique) :

- Sans chauffage, les zones de moindre ventilation sont situées dans les coins de la pièce, d'autant plus si elles sont éloignées des entrées et sorties d'air. Au plafond les vitesses de l'air sont plus importantes, donc les couches hautes sont mieux ventilées.
- En présence de chauffage, le moteur principal des écoulements dans la pièce est le radiateur (phénomène déjà observé lors de l'étude paramétrique précédente). En dehors des flux convectifs observables près du radiateur, seules les vitesses d'air au niveau de la bouche d'entrée sont quantifiables mais leur orientation est très marquée par la présence du radiateur. La zone la moins ventilée se situe dans le coin haut du côté de l'entrée d'air.

Lors des essais physiques par visualisation par la fumée, celle-ci ne s'est pas avérée totalement satisfaisante en raison des vitesses très faibles des écoulements d'air. L'outil numérique est ainsi complémentaire à l'étude physique. Il permet de déterminer avec précision les champs de vitesse dans la pièce ainsi que les lignes de courants.

La validation du simulateur numérique devra être finalisée avec les résultats des nouveaux essais dans la pièce-laboratoire, qui suivront et étudieront notamment la diffusion de CO<sub>2</sub> comme indicateur de la présence humaine.

## **PARTIE 3 :** **COMMENT LE CO<sub>2</sub> SE DIFFUSE-T-IL DANS UNE PIÈCE ?**

**Objectif : Observer l'impact sur la ventilation de la présence humaine dans une pièce.**

Dans une pièce fermée, la présence humaine dégage du CO<sub>2</sub>, émis lors de la respiration, gaz qui est censé être évacué par le système de ventilation. Comment le CO<sub>2</sub> se disperse-t-il dans une pièce et comment éviter sa stagnation ? Pour mieux comprendre ce phénomène, QUALITEL a missionné le Laboratoire Aérodynamique Eiffel pour mener une étude afin de mieux comprendre la circulation de l'air et des polluants dans une pièce en présence d'une personne. Cette étude porte sur le comportement de l'air, via le CO<sub>2</sub>, et l'identification de zones de stagnation dans une pièce, en faisant varier les sources d'émissions, les positions des entrées d'air et du radiateur.

### **Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)**

Le CO<sub>2</sub> est considéré comme un excellent traceur de la qualité de l'air. En effet, l'ensemble des polluants de l'air intérieur auront le même « comportement » que le CO<sub>2</sub> : stagnation, dispersion, circulation... Par conséquent, des taux de CO<sub>2</sub> élevés sont révélateurs de la mauvaise évacuation des autres types de polluants de l'air intérieur.

L'air extérieur contient environ 0,04 % de CO<sub>2</sub>. Sa masse volumique à 20°C est de 1,83 kg/m<sup>3</sup>.

À partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel à cause du risque d'asphyxie par privation d'oxygène, bien que le CO<sub>2</sub> ne soit pas chimiquement toxique. La valeur limite d'exposition est de 3 % sur une durée de quinze minutes. Au-delà, les effets sur la santé sont d'autant plus graves que la teneur en CO<sub>2</sub> augmente. Ainsi, à 2 % de CO<sub>2</sub> dans l'air, la fréquence respiratoire augmente. A 4 %, le rythme respiratoire s'accélère. À 10 %, peuvent apparaître des troubles visuels jusqu'au décès. Selon la norme NF EN 13779, les concentrations en CO<sub>2</sub> sont d'environ 350 ppm dans les zones rurales, de 375 ppm dans les petites villes et de 400 ppm dans les centres des villes polluées.

Dans les bâtiments les variations de CO<sub>2</sub> sont très importantes car les occupants en rejettent dans l'air expiré. Ce taux dépend du nombre d'occupants, de la durée d'occupation, du taux de renouvellement d'air et du volume de la salle. Selon les termes de cette norme, les teneurs en CO<sub>2</sub> ne devraient pas dépasser les valeurs extérieures de 700 ppm soit 1000 ppm à l'intérieur pour avoir une qualité d'air modérée.

## **1. Présentation de l'étude n°1**

Les études précédentes sur la comparaison entre essais physiques et numériques ont démontré une concordance satisfaisante pour la valeur des températures dans la pièce ainsi que les mouvements d'air. Cette étude a pour objectif de finaliser la mise au point l'outil de simulation numérique sur la diffusion du CO<sub>2</sub> en visualisant les écoulements, difficiles à réaliser dans la maquette physique du fait de leurs vitesses très faibles.

Pour mener à bien cette étude, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a utilisé la maquette initiale pour les simulations physiques.

## 1.1. Caractéristiques

- Chambre de dimensions 3.65m x 2.75m x 2,2m (volume de 22 m<sup>3</sup>) avec une porte intérieure (détalonnage de 2 cm) et une fenêtre extérieure intégrant une fente type d'admission d'air neuf ;
- Taux de renouvellement d'air : 0,5 volume par heure (établi par un système d'aspiration mécanique réglable). L'interaction du vent sur le bâtiment n'est pas prise en compte ;
- Une entrée d'air positionnée à 20 cm du plafond de la pièce. ;
- La sortie d'air positionnée au sol sur le côté de la pièce (2 cm en hauteur et 80 cm en longueur) reliée à un système d'aspiration à un débit variable ;
- Système de chauffage : modèle de radiateur électrique convectif de 1000 Watts
- Différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la pièce : 10°C maximum
- Emission de CO<sub>2</sub> par la fente d'admission d'air neuf ou une source intérieure située à une hauteur de 1.2m du sol.

Placée en entrée, cette source de CO<sub>2</sub> a pour objectif d'identifier les circuits aérauliques dans une pièce par ensemencement. A l'intérieur de la pièce, cette même source simule la présence d'une personne dans la pièce et permet d'analyser différemment le phénomène de diffusion de ce gaz dans une pièce.

## 1.2. Méthodologie

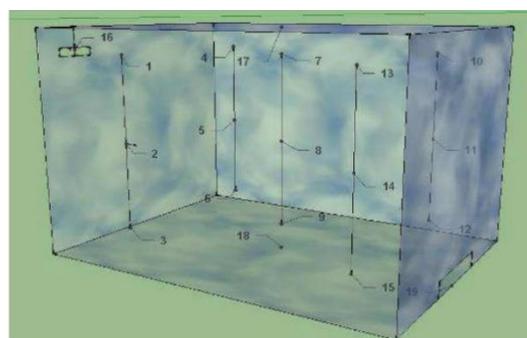
Le protocole est identique à l'étude comparative précédente avec la présence supplémentaire d'un traceur « CO<sub>2</sub> », mélangé à l'air à l'entrée d'air. Il permet de visualiser les zones où l'énergie cinétique est plus élevée.

Le taux de CO<sub>2</sub> émis par une personne est compris entre 40 000 et 50 000 ppm<sup>2</sup>(4% - 5%) et le débit éjecté par expiration se situe entre 15 et 25 l/h (environ 0,3 l/min). Dans les essais physiques, le débit de CO<sub>2</sub> est compris entre 0.06 l/min et 0.7 l/min.

20 sondes de température et 20 prises de captation de gaz sont réparties dans la pièce (emplacement identiques).

La période d'acquisition est de 8h.

### **Positionnement des sondes dans la maquette numérique :**



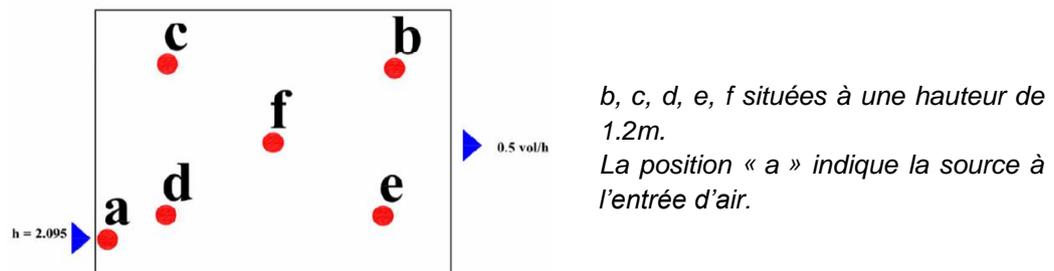
<sup>2</sup> Une partie par million (ppm) est le taux de CO<sub>2</sub>. Un ppm correspond à un rapport de 10<sup>-6</sup>, soit, par exemple, un milligramme par kilogramme. Ce n'est pas une concentration mais un rapport entre deux valeurs, comme un pourcentage.

### 1.3. Mesures

Différentes configurations sont testées et regroupées comme suit :

- Sans chauffage, débit de renouvellement d'air de 0,5 vol/h, source d'émission de CO2 dans l'entrée d'air ;
- Sans chauffage, débit de renouvellement d'air de 0.5 vol/h, source d'émission de CO2 en différents emplacements à l'intérieur de la pièce à 1,20 m de hauteur ;
- Sans chauffage, sans renouvellement d'air, source d'émission de CO2 en différents emplacements à l'intérieur de la pièce à 1,20 m de hauteur ;
- Avec chauffage, débit de renouvellement d'air de 0.5 vol/h, source d'émission de CO2 en différents emplacements à l'intérieur de la pièce à 1,20 m de hauteur.

**Positions des sources d'émission :**



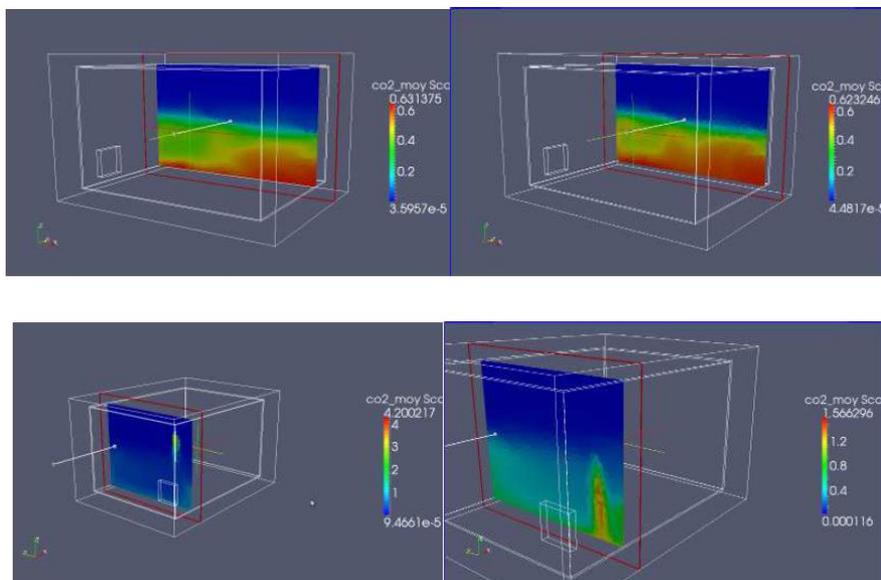
### 1.4. Résultats

#### a. Simulations numériques

Le CO2 a les mêmes caractéristiques que l'air (masse volumique, viscosité), mais il est tracé avec une couleur. Ce traceur nous montre les zones où il y a une énergie cinétique plus élevée (rouge).

##### a1. Sans chauffage

**Taux de CO2 dans la pièce :**



En présence de CO<sub>2</sub> injecté sans chauffage, une ventilation de type « déplacement inversé » s'effectue dans la pièce avec une **stratification du CO<sub>2</sub> au sol**. Sa masse volumique étant supérieure à celle de l'air, il est plus lourd et reste au sol. Cette stratification du CO<sub>2</sub> au sol s'interrompt à la mi-hauteur de la pièce, que le CO<sub>2</sub> soit émis à l'entrée ou à l'intérieur. Le dioxyde de carbone est entraîné vers la sortie c'est pour ça qu'il y a une légère accumulation sur le côté sortie.

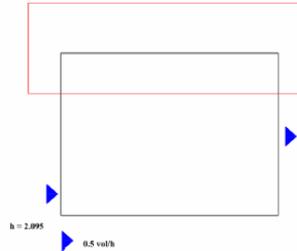


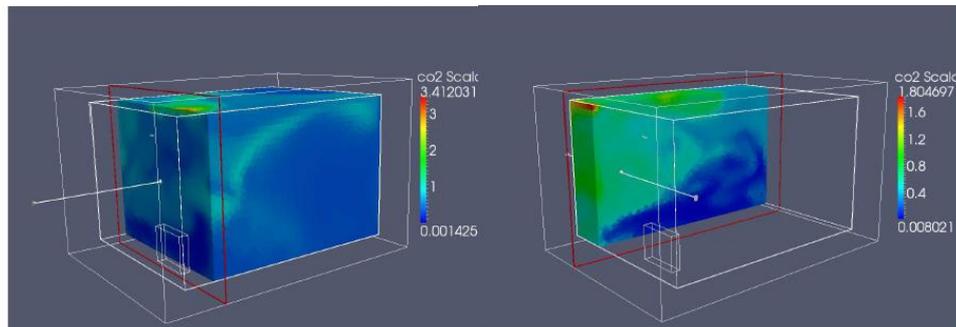
Figure 5-2 En rouge nous délimitons la zone à plus faible énergie cinétique

Les essais avec le traceur nous montrent que les zones à plus faible énergie cinétique sont situées du côté le plus proche de la sortie d'air et le plus éloigné de l'entrée d'air. En effet la zone la moins ventilée est située sur la paroi longitudinale la plus éloignée de l'entrée (cf. figure 5-2).

Nota : Cette configuration s'éloigne de la réalité car les pièces sont moins étanches et le CO<sub>2</sub> est émis à l'intérieur de la pièce dans des logements réellement construits.

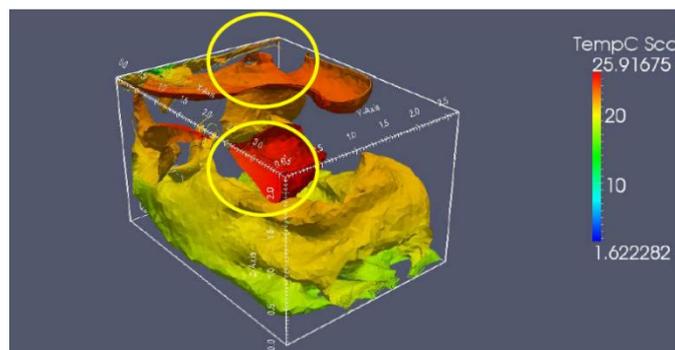
## a2. Avec chauffage

### Taux de CO<sub>2</sub> dans la pièce :



Et présence de CO<sub>2</sub> à l'intérieur de la pièce avec du chauffage, on observe une ventilation de type « mixte » et la **stratification disparaît**. Comme déjà démontré dans les études précédentes, le chauffage devient la pompe de brassage de l'air. Le CO<sub>2</sub> est mélangé dans l'air par les mouvements convectifs dû au chauffage. En traversant la pièce, il est chauffé, sa masse volumique diminue et donc une partie reste au plafond (cercles jaunes).

### Poche de CO<sub>2</sub> à différentes T° :



Il reste donc difficile déterminer des zones mortes, mais on peut dire que en présence de CO<sub>2</sub> dans une pièce chauffée le risque d'un taux trop élevé de CO<sub>2</sub> se trouve au plafond et pas au sol. Le CO<sub>2</sub> a donc tendance à **s'accumuler au plafond mais plutôt dans les coins opposés de la pièce.**

### b. Simulations physiques (Maquette)

Dans toutes les acquisitions (avec débit de renouvellement d'air), les mesures sont réalisées avec une émission en CO<sub>2</sub> en continu, puis celle-ci est coupée lorsque l'expérimentateur constate une stabilisation des taux dans la pièce et on mesure alors la décroissance du taux dans la pièce.

Les tableaux suivants présentent l'ensemble des configurations testées :

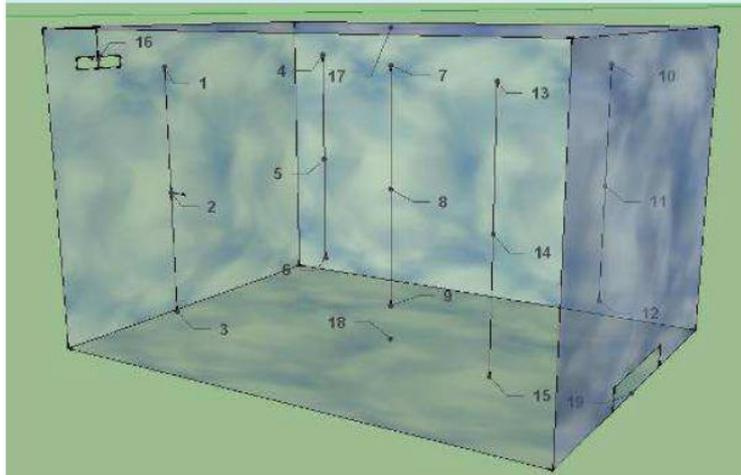
#### ISOTHERME – SANS CHAUFFAGE DEBIT RENOUVELLEMENT D' AIR 0.5 vol/h

Numéro configuration	Position de l'émission du CO <sub>2</sub>	Débit d'émission du CO <sub>2</sub> (l/min)	% débit CO <sub>2</sub> / aspiration	Période (h)	Commentaires
Conf. 1	A	Variable 0,2 - 1,2	Variable 0,10 - 0,65	7.5 h	Réglage du débit d'émission de CO <sub>2</sub>
Conf. 2	A	0,06	0,03	7h	Réglage du débit d'émission de CO <sub>2</sub>
Conf. 3	A	0,25	0,14	7h	
Conf. 4	B	0,25	0,14	8h	
Conf. 5	C	0,25	0,14	7h	
Conf. 6	D	0,25	0,14	6h	
Conf. 7	E	0,25	0,14	6h	
Conf. 8	E	0,25	0,14	6h	

#### PAS DE DEBIT RENOUVELLEMENT D' AIR, PIECE ETANCHE

Numéro configuration	Position de l'émission du CO <sub>2</sub> (m)	Débit d'émission du CO <sub>2</sub> (l/min)	% débit CO <sub>2</sub> / aspiration	Période (h)	Commentaires
Conf. 9	E	0,7		6.5h	Pas d'aspiration dans la pièce
Conf. 10	E	0,7		6h	Réglage des appareils
Conf. 11	E	0,7		7h	Pas d'aspiration dans la pièce
Conf. 12	E	0,1		5.5h	Pas d'aspiration dans la pièce
Conf.13	C	0,7		??0	

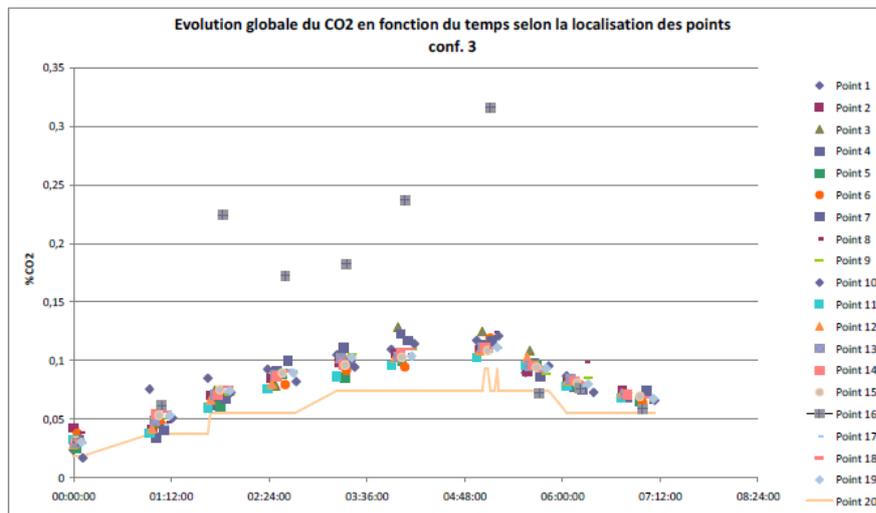
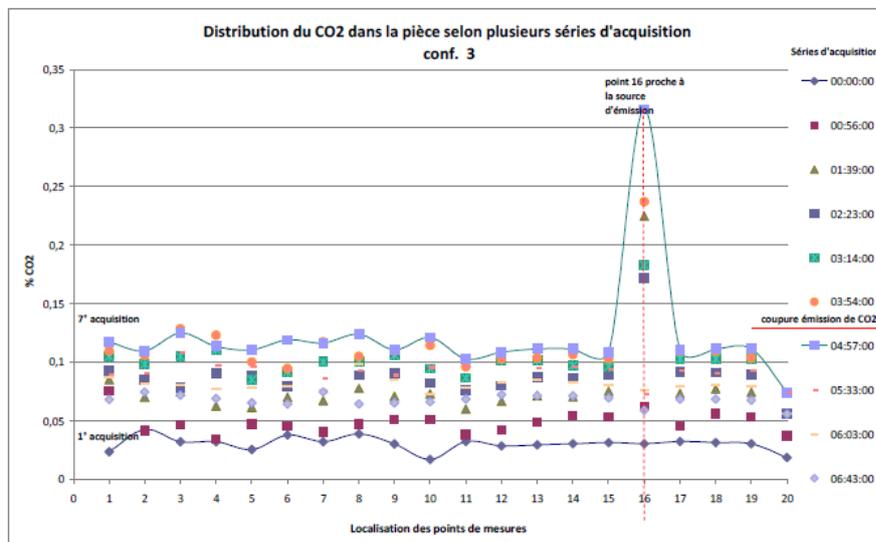
Le taux du point 16 est beaucoup plus élevé puisqu'il est proche de la source d'émission.



La mesure des taux de concentrations de CO2 s'est révélée assez compliquée à mettre en œuvre car les essais se font dans une enceinte étanche avec des dynamiques de flux très faibles et des concentrations mesurées de CO2 également faibles.

**b1. Sans chauffage, émission du CO2 dans l'entrée d'air**

Les 3 premières configurations sont réalisées avec un ensemencement en CO2 dans l'entrée d'air pour contrôler sa diffusion dans la pièce.

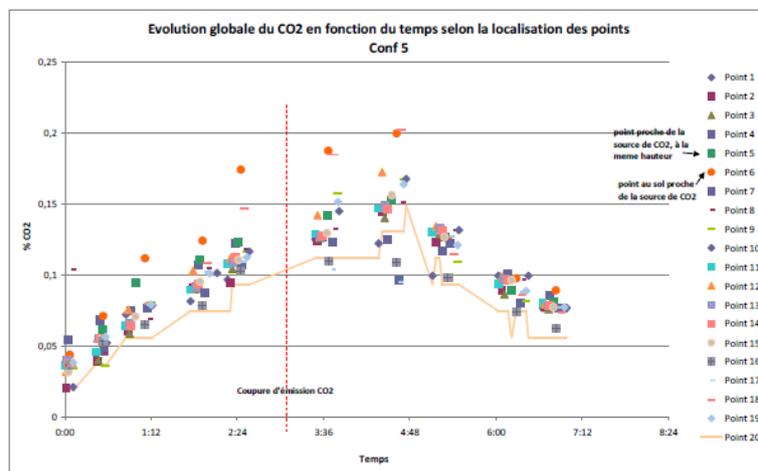
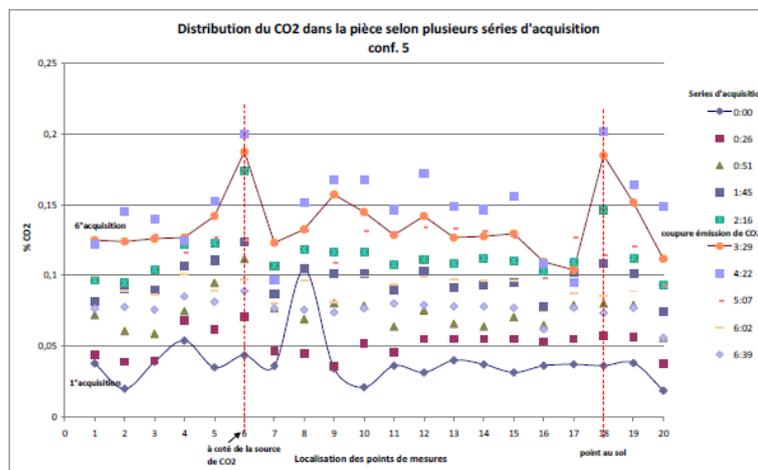


Les observations réalisées dans cette configuration sont les suivantes :

- Une élévation globalement constante dans le temps du taux de CO<sub>2</sub> dans la pièce. Le gaz a effectivement tendance à occuper tout le volume mis à sa disposition ;
- Une variation faible du taux de CO<sub>2</sub> sur la hauteur alors que nous nous attendions à des concentrations fortes au sol et faibles au plafond. Cependant les simulations numériques montrent qu'il n'y a quasiment pas de gradient de concentrations sauf à proximité immédiate du sol ;
- Il faut 3h pour atteindre la concentration moyenne de 0,10% (1 000 ppm), et 4/5h pour atteindre les concentrations les plus élevées (0.12%) et après l'arrêt de l'émission de CO<sub>2</sub> la concentration reste stable pendant presque 1h puis redescend à 0,04% en 2h.

## b2. Sans chauffage, émission de CO<sub>2</sub> dans la pièce

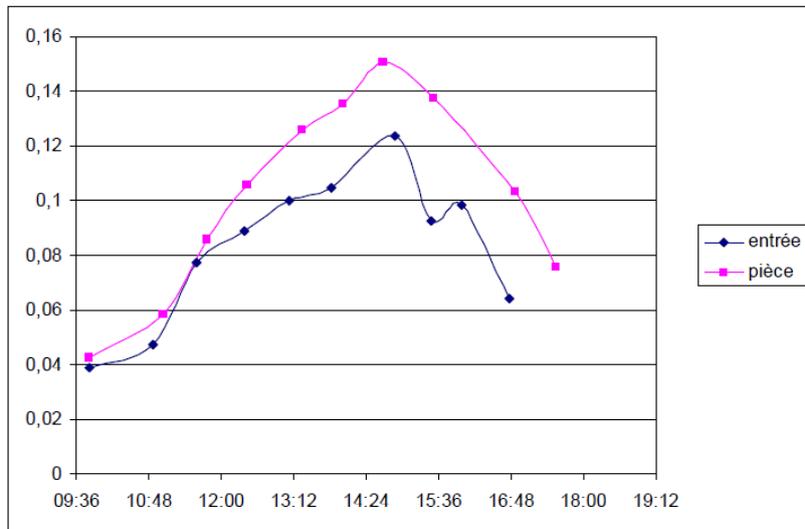
(Renouvellement d'air réglementaire de 0,5 volume/heure et un débit de 0,25 l/min, l'équivalent des émissions d'une personne adulte)



Les observations réalisées dans cette configuration sont les suivantes :

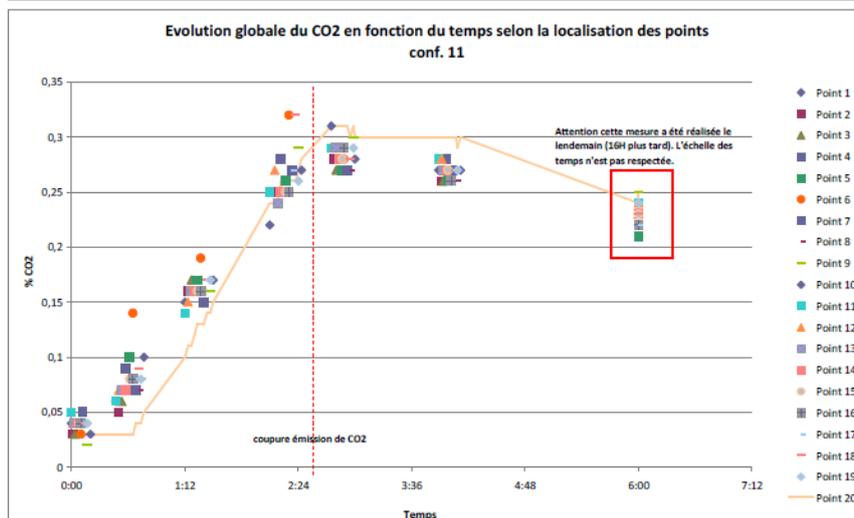
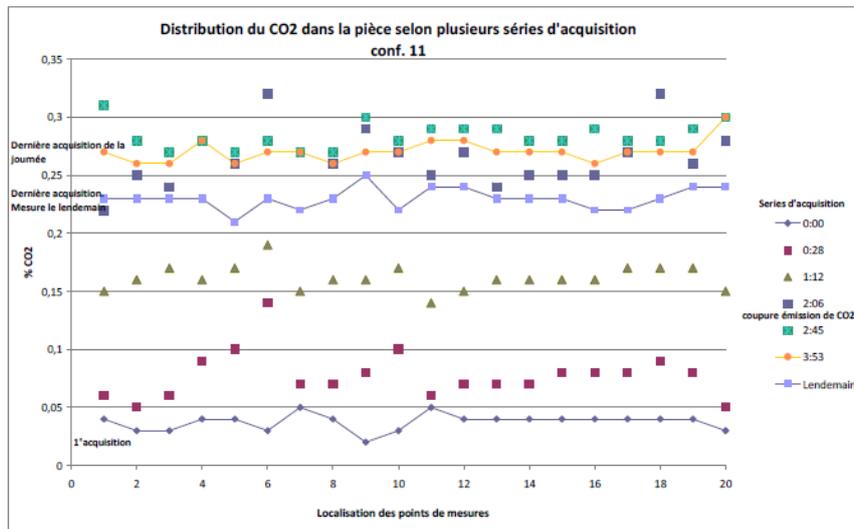
- Une plus grande dispersion des taux de CO<sub>2</sub> sans pour autant qu'apparaissent de façon explicite un gradient du taux de concentration. **Les points les plus proches du sol et de la source d'émission ont des taux plus élevés.** C'est aussi ce qu'on constate avec les simulations numériques ;
- Comme pour les essais avec émission de CO<sub>2</sub> dans l'entrée, les taux de concentration semblent se stabiliser, en moyenne, vers 0,12% à 0,16%, donc **plus fort qu'avec l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'entrée.** Il faudra néanmoins vérifier sur des périodes plus longues si la stabilisation est avérée. Les points de concentration les plus élevés se rapprochent de 0,18% au bout de 4h puis redescendent à 0.06% en 2h.

**Evolution du taux de CO2 pour le point situé au centre de la pièce avec une émission de CO2 dans l'entrée d'air (bleu) ou dans la pièce (rose) :**



On constate donc des concentrations en CO2 plus fortes quand l'émission de CO2 se fait au centre de la pièce et plus près du sol. En revanche l'augmentation des concentrations de CO2 se fait pendant 4/5h pour atteindre entre 1200 et 1400 ppm puis redescendent pendant 2/3h dans les 2 cas pour tomber à 600/700ppm. Les taux de CO2 semblent donc se stabiliser autour de 5h.

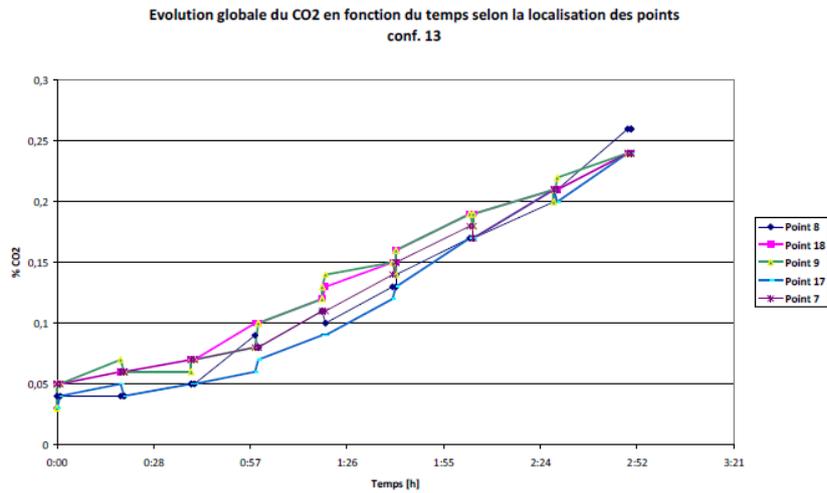
**b3. Sans chauffage, sans aspiration**



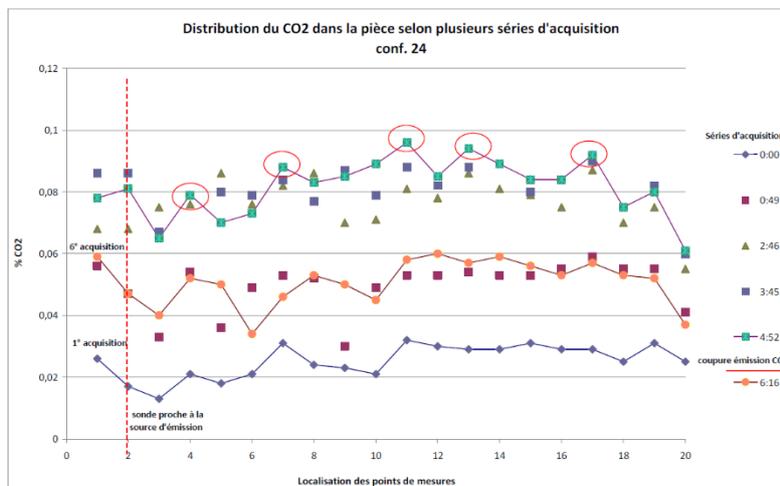
Les concentrations en CO2 sont bien plus élevées, plus rapidement sans renouvellement d'air (environ 0.3% de CO2 atteint en moins de 3 heures), puis diminuent à la coupure d'émission de CO2 mais moins rapidement (toujours 0.23% CO2 en moyenne le lendemain).

**On observe clairement l'importance du renouvellement d'air dans une pièce afin de limiter les concentrations en polluants et permettre de les éliminer plus rapidement.**

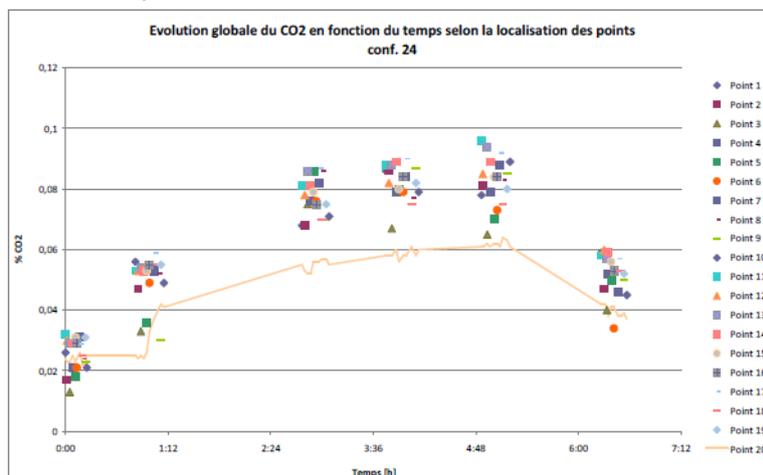
D'autre part, les concentrations de CO2 sont plus élevées au sol qu'au plafond mais ce gradient de concentration s'atténue quand on atteint des niveaux de concentrations élevées en CO2 :



**b4. Avec chauffage, émission dans la pièce**



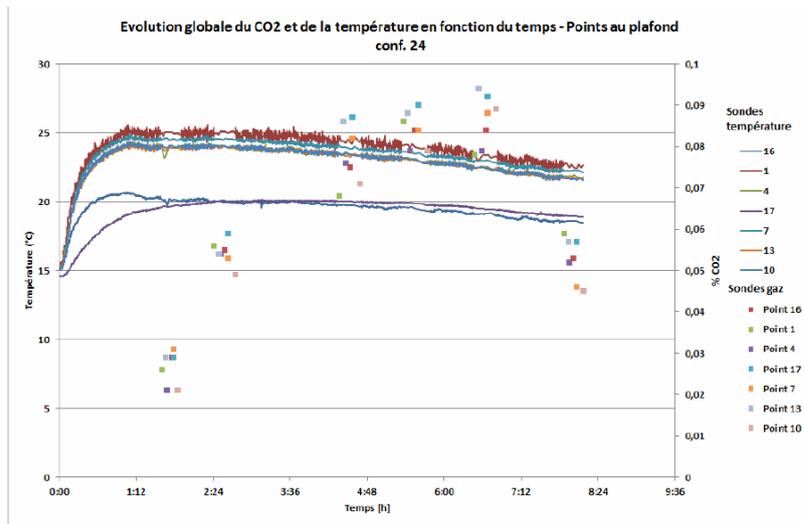
Les taux de concentration semblent se stabiliser, en moyenne, vers 0,08%, donc **plus faibles que sans chauffage** et au bout de 4/5h puis diminuent à 0.05% en 2 heures.



Les graphiques montrent qu'il est difficile d'observer des tendances de distributions suivant le positionnement des sources d'émission. Il semble que les zones où les taux de CO2 sont les plus forts ou les plus faibles restent les mêmes quel que soit l'endroit d'émission (paquet de points).

En revanche **le taux de CO2 est plus élevé sur les points au plafond** (encadrés en rouge dans le tableau ci-dessous). C'est donc l'inverse des phénomènes observés sans chauffage.

Contrairement aux essais isothermes, les points très proches de la source d'émission, n'ont pas un taux de concentration plus élevé par rapport aux autres.



Avec chauffage, il faut plus de 7h pour sembler atteindre une stabilité des taux de CO2, alors qu'il faut une heure pour une stabilité des températures.

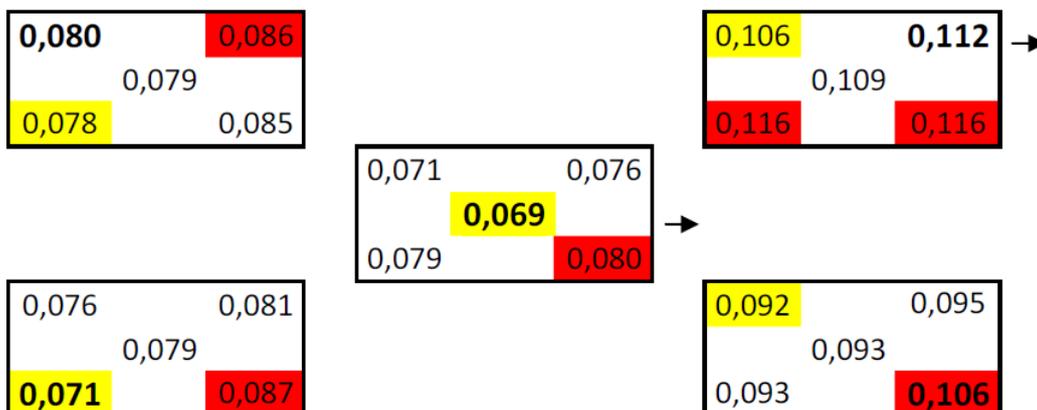
**b5. Schémas de synthèse avec chauffage**

Les schémas ci-dessous sont une vue en plan des pièces et les valeurs des taux sont la moyenne des 3 points sur la hauteur.

Les essais numériques ou les résultats des précédentes campagnes avaient montré que les zones les moins ventilées étaient situés en haut à gauche (numérique et physique avec température) et aussi en bas à droite (numérique).

**Valeurs des taux de CO2 moyennés des 3 points sur la hauteur :**

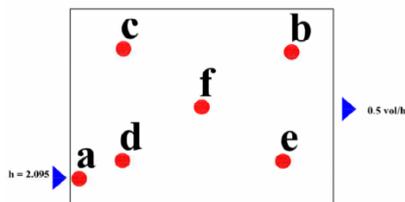
La valeur en gras indique la zone d'émission, en rouge le taux maximum, en jaune le taux minimum.



On remarque ainsi que le taux de CO<sub>2</sub> est en général le plus faible dans la zone en haut à gauche sur les schémas ci-dessus qui était identifiée comme la zone de moindre ventilation dans les campagnes précédentes. A contrario, la zone en bas à droite est la zone où les taux sont en général les plus forts (concentration plus élevée).

Ceci pourrait s'expliquer avec les essais numériques : l'air accéléré au-dessus du chauffage entraîne le CO<sub>2</sub> avec une vitesse relativement élevée au plafond puis ralenti en atteignant le côté opposé et le CO<sub>2</sub>, plus lourd que l'air, resterait dans cette zone.

**Les zones les moins ventilées, ayant des vitesses d'air plus faibles, semblent correspondre à celles où le taux de CO<sub>2</sub> est aussi le plus faible.** Cela peut paraître étonnant mais dans les zones où on ventile moins, on amène moins de CO<sub>2</sub>, plus lourd, et qui a donc tendance à stagner.



Les taux maximums de CO<sub>2</sub> restent en dessous de 0,10% pour les positions c, d et e et en dessous de 0,12% pour les positions b et f.

## 1.5. Conclusion

Cette campagne de simulations physique et numérique a permis d'observer la diffusion du CO<sub>2</sub> dans une pièce, en simulant la présence humaine à différents endroits de la pièce, avec et sans chauffage.

Les simulations de CO<sub>2</sub> sont comparables avec cependant une visualisation possible en numérique de l'évolution des concentrations en CO<sub>2</sub> avec la hauteur, permettant d'identifier les circuits aérauliques.

Cette étude permet ainsi d'évaluer les taux de CO<sub>2</sub> qui pourraient être mesurés dans une chambre fermée dans laquelle une personne dort pendant 8 h. Les tests effectués révèlent également qu'une stratification des concentrations en CO<sub>2</sub> existe mais de manière minime.

Sans chauffage, les zones les moins ventilées sont situées dans les coins de la pièce, les plus éloignées des entrées et sorties d'air. Les taux de CO<sub>2</sub> sont plus élevés près du sol à côté des lieux d'émission, ce que l'on ne voit pas avec les simulations avec chauffage. Il est donc recommandé de surélever le lit, plutôt que poser le matelas directement au sol.

**Dans une pièce chauffée, le taux de CO<sub>2</sub> est plus élevé dans les zones situées en hauteur et dans les coins de la pièce. Les taux maximums de CO<sub>2</sub> sont plus faibles dans la configuration avec chauffage, restant en dessous de 1200ppm.** Il semble donc moins impactant de chauffer légèrement une pièce (différence de 10°C entre température extérieure et intérieure).

Les taux de CO<sub>2</sub> augmentent fortement sans ventilation pour atteindre près de 3000ppm en moins de 3 heures. L'absence de ventilation dans une pièce semble très néfaste pour la qualité de l'air.

**En moyenne, avec ou sans chauffage, les concentrations maximums en CO<sub>2</sub> sont atteintes autour de 4/5h. Les taux se stabilisent à partir de 7/8h, alors que sans chauffage, le temps de stabilisation se situe autour de 5h.** Il faudrait vérifier sur un temps plus long d'acquisition l'évolution.

## 2. Présentation de l'étude n°2

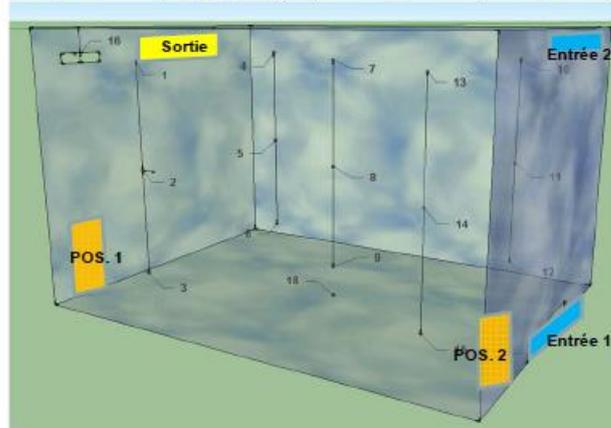
Pour mener cette étude, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a utilisé la maquette initiale avec les mêmes caractéristiques et en intégrant une source d'émission de CO<sub>2</sub> pour simuler la présence d'une personne dans la pièce. Cette étude porte toujours sur le comportement de l'air, via le CO<sub>2</sub>, et l'identification de zones de stagnation dans une pièce, en faisant varier les positions des entrées d'air et du radiateur. Ainsi, cette étude permettra de comprendre comment s'extrait le CO<sub>2</sub> dans une pièce disposant d'une VMC ou pas.

### 2.1. Méthodologie

Six configurations ont été testées : en faisant varier la position de l'entrée et de la sortie d'air (en partie haute ou basse) et du radiateur (à proximité de l'entrée d'air ou de la sortie d'air).

Pour simuler la présence d'une personne debout dans la pièce, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a procédé à l'émission de CO<sub>2</sub> de 0,25 L/minute au moyen d'une source placée au centre de la pièce, à 1,2 m de hauteur du sol.

n. Configurations	Température	Position radiateur	Position entrée	Effectuées
1	sans chauffage	0	1	x
2	sans chauffage	0	2	x
3	avec chauffage	1	2	x
4	avec chauffage	2	2	x
5	avec chauffage	2	1	x
6	avec chauffage	1	1	x



NIVEAU 20 CM DU SOL	NIVEAU 110 CM DU SOL	NIVEAU 195 CM DU SOL																																	
<table border="1"> <tr><td>6</td><td></td><td>12</td></tr> <tr><td></td><td>9</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>18 au sol</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td>15</td></tr> </table>	6		12		9			18 au sol		3		15	<table border="1"> <tr><td>5</td><td></td><td>11</td></tr> <tr><td></td><td>8</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td>14</td></tr> </table>	5		11		8		2		14	<table border="1"> <tr><td>4</td><td></td><td>10</td></tr> <tr><td></td><td>7</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>17 au plafond</td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td>13</td></tr> </table>	4		10		7			17 au plafond		1		13
6		12																																	
	9																																		
	18 au sol																																		
3		15																																	
5		11																																	
	8																																		
2		14																																	
4		10																																	
	7																																		
	17 au plafond																																		
1		13																																	

### 2.2. Mesures

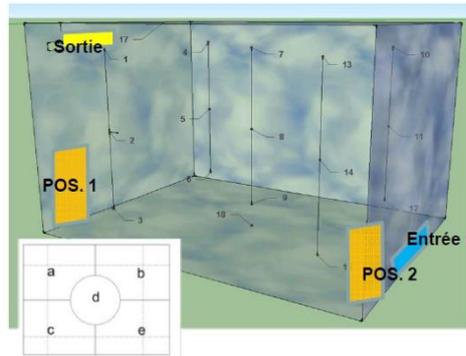
L'étude a consisté à mesurer les taux de CO<sub>2</sub> à différents endroits de la pièce :

- Taux de renouvellement d'air de 0,5 volume par heure (correspond à l'exigence réglementaire).
- Selon 6 configurations : variation des positions des entrées d'air, sorties d'air et du radiateur.
- 20 sondes de température et de mesures de gaz réparties dans la pièce.
- La période d'acquisition est de 8h.

### 2.3. Résultats

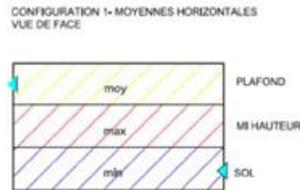
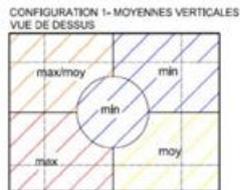
**Comparaison configurations 1, 5 et 6 (configurations correspondant à un séjour dans un logement ancien) :**

- Aspiration de l'air en partie haute.
- Entrée d'air située en partie basse pour simuler le détalonnage de porte.
- Sortie d'air située en partie haute pour simuler l'extraction par la fenêtre ou la perméabilité à l'air d'une fenêtre ancienne.
- 3 configurations testées : sans chauffage et selon 2 positions de radiateur, à proximité de l'entrée d'air, à proximité de la sortie. Ce sont les cas les plus défavorables comme l'a montré l'étude sur la diffusion de l'air dans une pièce, ces positions induisent le plus de stagnation d'air dans la pièce.



#### Configuration n°1 :

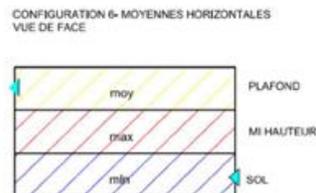
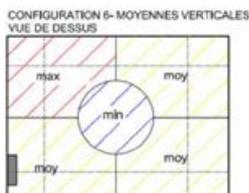
#### Configuration 1



	Moyenne CO2 (%)		
	Au sol	Mi-hauteur	Plafond
Moyenne 1ere série	0,068	0,066	0,062
Moyenne 2eme série	0,084	0,084	0,085
Moyenne 3eme série	0,086	0,098	0,101
Moyenne 4eme série	0,093	0,104	0,098
Moyenne 5eme série	0,103	0,105	0,102
Moyenne 6eme série	0,080	0,091	0,087
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,086</b>	<b>0,091</b>	<b>0,089</b>

	Moyenne CO2 (%)				
	a	b	c	d	e
Moyenne 1ere série	0,066	0,061	0,074	0,062	0,064
Moyenne 2eme série	0,084	0,076	0,103	0,081	0,081
Moyenne 3eme série	0,104	0,104	0,094	0,085	0,092
Moyenne 4eme série	0,096	0,094	0,107	0,097	0,099
Moyenne 5eme série	0,116	0,095	0,102	0,105	0,096
Moyenne 6eme série	0,086	0,085	0,084	0,084	0,092
Moyenne totale	<b>0,092</b>	<b>0,086</b>	<b>0,094</b>	<b>0,086</b>	<b>0,087</b>
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,089</b>				

#### Configuration n 6 :



	Moyenne CO2 (%)		
	Au sol	Mi-hauteur	Plafond
Moyenne 1ere série	0,051	0,066	0,069
Moyenne 2eme série	0,068	0,082	0,082
Moyenne 3eme série	0,077	0,089	0,084
Moyenne 4eme série	0,085	0,091	0,086
Moyenne 5eme série	0,089	0,105	0,102
Moyenne 6eme série	0,097	0,109	0,100
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,078</b>	<b>0,090</b>	<b>0,087</b>

	Moyenne CO2 (%)				
	a	b	c	d	e
Moyenne 1ere série	0,069	0,065	0,059	0,057	0,065
Moyenne 2eme série	0,077	0,081	0,075	0,075	0,077
Moyenne 3eme série	0,092	0,090	0,079	0,076	0,083
Moyenne 4eme série	0,091	0,087	0,097	0,078	0,088
Moyenne 5eme série	0,109	0,099	0,101	0,090	0,098
Moyenne 6eme série	0,102	0,102	0,106	0,096	0,104
Moyenne totale	0,090	0,087	0,086	0,079	0,086
Moyenne totale	0,086				

**Configuration n°5 :**

CONFIGURATION 5- MOYENNES VERTICALES  
VUE DE DESSUS

CONFIGURATION 5- MOYENNES HORIZONTALES  
VUE DE FACE

	Moyenne CO2 (%)		
	Au sol	Mi-hauteur	Plafond
Moyenne 1ere série	0,061	0,061	0,056
Moyenne 2eme série	0,076	0,087	0,078
Moyenne 3eme série	0,077	0,098	0,082
Moyenne 4eme série	0,082	0,096	0,092
Moyenne 5eme série	0,085	0,094	0,091
Moyenne totale	0,076	0,087	0,080

	Moyenne CO2 (%)				
	a	b	c	d	e
Moyenne 1ere série	0,052	0,051	0,067	0,062	0,064
Moyenne 2eme série	0,085	0,077	0,072	0,084	0,076
Moyenne 3eme série	0,083	0,094	0,086	0,078	0,088
Moyenne 4eme série	0,092	0,089	0,101	0,083	0,089
Moyenne 5eme série	0,094	0,089	0,094	0,082	0,093
Moyenne totale	0,081	0,080	0,084	0,078	0,082
Moyenne totale	0,081				

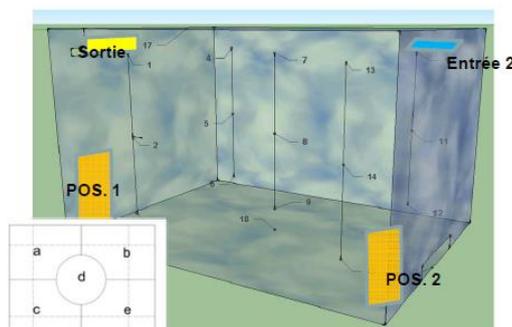
Dans ces configurations, une légère stratification du CO<sub>2</sub> a été constaté : le taux minimum au sol, le moyen au plafond et le maximum au milieu. La présence du chauffage (config 5 et 6) ne change pas la stratification par couches horizontales quelle que soit la position du radiateur.

Les taux de CO<sub>2</sub> sont plus élevés sans chauffage (config 1 : 0,089 % en moyenne) et la config 5 (entrée d'air et radiateur proches) semble présenter des taux de CO<sub>2</sub> les plus faibles (0,081 % en moyenne).

**Dans les différentes configurations testées, les secteurs a et c, zones proches de la sortie d'air, ont des taux de CO<sub>2</sub> plus élevés. Avec ou sans chauffage, la zone d au centre a toujours un taux plus faible. C'est donc une zone mieux brassée.**

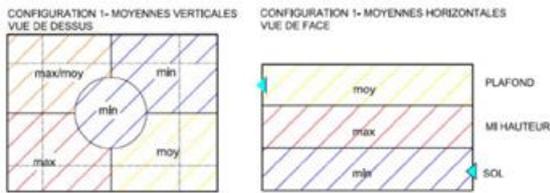
**Comparaison des configurations 2, 3 et 4 (configurations correspondant à un séjour avec cuisine ouverte dans un logement neuf) :**

- Aspiration de l'air en partie haute.
- Entrée d'air située en partie haute pour simuler l'entrée d'air d'une fenêtre.
- Sortie d'air située en partie haute pour simuler la bouche d'extraction de la VMC.
- 2 positions de radiateur testées : une à proximité de l'entrée d'air, l'autre à proximité de la sortie.



**Configuration n°2 :**

**Configuration 2**



	Moyenne CO2 (%)		
	Au sol	Mi-hauteur	Plafond
Moyenne 1ere série	0,069	0,062	0,065
Moyenne 2eme série	0,086	0,083	0,081
Moyenne 3eme série	0,087	0,084	0,082
Moyenne 4eme série	0,102	0,094	0,087
Moyenne 5eme série	0,103	0,088	0,089
Moyenne 6eme série	0,094	0,104	0,091
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,090</b>	<b>0,086</b>	<b>0,082</b>

	Moyenne CO2 (%)				
	a	b	c	d	e
Moyenne 1ere série	0,065	0,061	0,071	0,068	0,061
Moyenne 2eme série	0,087	0,080	0,086	0,085	0,075
Moyenne 3eme série	0,083	0,082	0,085	0,088	0,081
Moyenne 4eme série	0,101	0,084	0,091	0,104	0,085
Moyenne 5eme série	0,100	0,090	0,088	0,098	0,088
Moyenne 6eme série	0,097	0,092	0,097	0,099	0,094
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,089</b>	<b>0,082</b>	<b>0,086</b>	<b>0,090</b>	<b>0,081</b>
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,086</b>				

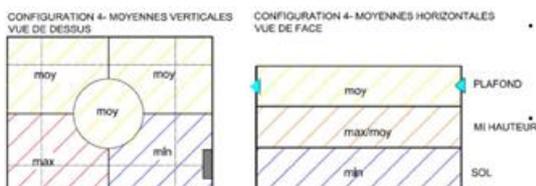
**Configuration 3 :**



	Moyenne CO2 (%)		
	Au sol	Mi-hauteur	Plafond
Moyenne 1ere série	0,056	0,075	0,067
Moyenne 2eme série	0,077	0,090	0,089
Moyenne 3eme série	0,088	0,090	0,096
Moyenne 4eme série	0,091	0,104	0,100
Moyenne 5eme série	0,091	0,108	0,094
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,081</b>	<b>0,093</b>	<b>0,089</b>

	Moyenne CO2 (%)				
	a	b	c	d	e
Moyenne 1ere série	0,067	0,062	0,076	0,063	0,063
Moyenne 2eme série	0,082	0,077	0,091	0,089	0,084
Moyenne 3eme série	0,099	0,095	0,095	0,084	0,088
Moyenne 4eme série	0,100	0,104	0,089	0,101	0,092
Moyenne 5eme série	0,091	0,103	0,105	0,092	0,098
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,088</b>	<b>0,088</b>	<b>0,091</b>	<b>0,086</b>	<b>0,085</b>
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,088</b>				

**Configuration 4 :**



	Moyenne CO2 (%)		
	Au sol	Mi-hauteur	Plafond
Moyenne 1ere série	0,065	0,065	0,064
Moyenne 2eme série	0,088	0,081	0,088
Moyenne 3eme série	0,092	0,096	0,097
Moyenne 4eme série	0,096	0,104	0,102
Moyenne 5eme série	0,090	0,109	0,097
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,086</b>	<b>0,091</b>	<b>0,090</b>

	Moyenne CO2 (%)				
	a	b	c	d	e
Moyenne 1ere série	0,063	0,065	0,062	0,069	0,062
Moyenne 2eme série	0,092	0,083	0,088	0,084	0,083
Moyenne 3eme série	0,098	0,098	0,091	0,093	0,096
Moyenne 4eme série	0,100	0,104	0,105	0,098	0,096
Moyenne 5eme série	0,099	0,096	0,112	0,095	0,092
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,090</b>	<b>0,089</b>	<b>0,092</b>	<b>0,088</b>	<b>0,086</b>
<b>Moyenne totale</b>	<b>0,089</b>				

La circulation de l'air se fait de l'entrée vers la sortie, en restant à la hauteur du plafond. On constate une stratification du CO<sub>2</sub> avec un taux plus fort au sol : 0,09% (CO<sub>2</sub> plus lourd que l'air) et décroissant avec la hauteur sans chauffage (0,082% au plafond).

Les taux de CO<sub>2</sub> sont en moyenne plus faibles qu'avec le chauffage (0,086% dans config 2 contre 0,088% et 0,089% dans config 3 et 4), le phénomène inverse est observé dans les configurations précédentes.

**La présence du chauffage (position 1 ou 2 du radiateur) change les taux de CO<sub>2</sub> dans les strates avec un taux maximum au milieu.** En effet, le radiateur chauffe le CO<sub>2</sub> du sol, qui est entraîné vers le haut. Et le CO<sub>2</sub> au plafond est évacué plus rapidement que celui situé à mi-hauteur.

**Il y a globalement (avec et sans chauffage) toujours une concentration de CO<sub>2</sub> plus faible du côté de l'entrée d'air (zones b et e, vue en plan). Ce sont des zones mieux ventilées.** Les secteurs a et c ont des taux plus élevés (zones proches de la sortie). En l'absence de chauffage, le taux de CO<sub>2</sub> maximum est cependant en zone d (au centre).

## 2.4. Conclusion

Pour les configurations correspondant à un séjour dans un logement ancien, les concentrations en CO<sub>2</sub> sont en moyenne un peu plus faibles (config 1, 5 et 6 avec 0,083%) que celles correspondant à un séjour avec cuisine ouverte dans un logement récent (config 2, 3 et 4 avec 0,087%) mais restent du même ordre de grandeur. Pour ces premières configurations, une légère stratification du CO<sub>2</sub> a été constaté : le taux minimum au sol et le maximum au milieu. Les taux de CO<sub>2</sub> sont plus élevés sans chauffage et les plus faibles quand l'entrée d'air et le radiateur sont proches et au centre de la pièce. Les zones proches de la sortie d'air, ont des taux de CO<sub>2</sub> plus élevés et sont donc les moins ventilées.

Pour les configurations correspondant à un séjour avec cuisine ouverte dans un logement récent les zones mieux ventilées sont aussi situées près de l'entrée d'air (avec et sans chauffage) et les zones proches de la sortie d'air sont également les moins ventilées, mais en l'absence de chauffage, la zone au centre devient la moins bien ventilée. Ce phénomène de zone morte, au centre, n'apparaît pas quand la pièce est ventilée et non chauffée. Sans chauffage, le CO<sub>2</sub> tombe au sol, avec des concentrations plus élevées. Les taux de CO<sub>2</sub> augmentent avec le chauffage et sont au maximum à mi-hauteur.

Finalement, dans les 2 configurations, la stratification reste faible, et la pièce se remplit de CO<sub>2</sub>.

## 3. Présentation de l'étude n°3

L'étude sur la diffusion du CO<sub>2</sub> a montré qu'au bout de 7/8h, dans un logement équipé ou non d'une VMC, il est nécessaire d'ouvrir les fenêtres pour évacuer le CO<sub>2</sub> accumulé, et les autres polluants, et renouveler l'air. Qu'en est-il pour une chambre occupée par deux personnes pendant toute une nuit ? Les résultats sont-ils similaires ou bien les concentrations de CO<sub>2</sub> sont-elles plus fortes et atteintes plus rapidement ? Pour analyser ce phénomène, QUALITEL a missionné le Laboratoire Aérodynamique Eiffel pour mener une étude complémentaire portant sur le comportement de l'air en présence de deux personnes, en faisant varier la position du radiateur et des sources de CO<sub>2</sub>.

Pour mener à bien cette étude, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a utilisé la maquette initiale en procédant à des ajustements pour simuler la présence de deux personnes dans la pièce.

### 3.1. Caractéristiques

- Pièce de type chambre, taille réelle de 10 m<sup>2</sup> (2,75m x 3,65m x 2,2m, soit 22m<sup>3</sup>).
- Cloison simulant une porte intérieure avec détalonnage de 2 cm faisant office d'entrée ou de sortie d'air.
- Fenêtre extérieure intégrant une bouche d'entrée/de sortie d'air neuf.
- Système de chauffage : modèle de radiateur électrique convectif de 1000 Watts.
- Différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la pièce : 10°C maximum.

De nouveaux éléments :

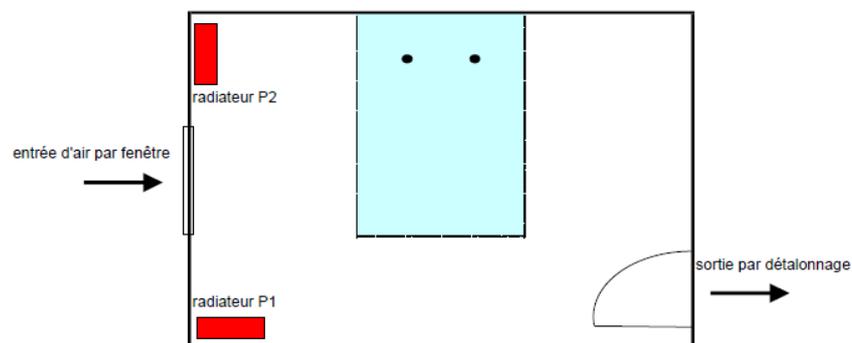
- 2 émissions de CO<sub>2</sub> à 65cm du sol avec un débit éjecté de 0.5l/min<sup>3</sup>
- Gabarit de 140x190x55cm modélisant un lit
- 2 positions différentes de radiateur : P1 et P2

### 3.2. Méthodologie

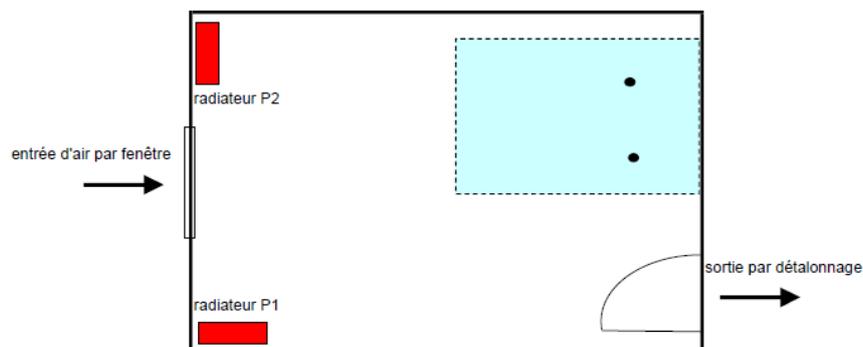
Cette maquette permet de reproduire la configuration d'une chambre avec une porte et une fenêtre. Pour simuler la présence de deux personnes dormant dans la pièce, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a procédé à l'émission de CO<sub>2</sub> au moyen de deux sources placées en tête de lit.

6 configurations ont été testées : en faisant varier la position du radiateur et du lit.

#### Configuration A :



#### Configuration B :



<sup>3</sup> Le débit éjecté par expiration par personne est compris entre 15 et 25 l/h (environ 0,3l/min),

### 3.3. Mesures

L'étude a consisté à mesurer les taux de CO<sub>2</sub> à différents endroits de la pièce :

- Taux de renouvellement d'air de 0,5 (correspond à l'exigence réglementaire), 0,7 et 1 volume/heure.
- Selon 6 configurations : variation des positions du radiateur et du lit.
- 40 sondes de température (thermocouples) et 19 sondes de mesures de gaz réparties dans la pièce.
- Période d'acquisition de 8 heures.

Les tableaux suivants représentent l'ensemble des configurations testées :

ISOTHERME – SANS CHAUFFAGE

Configuration	Position de l'émission du CO <sub>2</sub>	Débit d'émission du CO <sub>2</sub> (l/min)	Aspiration (vol/h)	Période (h)
Conf. 0_1	A	0,7 l/min	0.5	11 h
Conf. 0_2	A	0,7 l/min	1.0	10 h
Conf. 0_3	B	0,7 l/min	0.5	8 h
Conf. 0_4	B	0,7 l/min	1.0	8 h
Conf. 0_5	A	0,7 l/min	0.7	8 h
Conf. 0_6	B	0,7 l/min	0.7	8 h
Conf. 0_7	A	0,7 l/min	3.0	7 h
Conf. 0_8	B	0,7 l/min	3.0	7 h

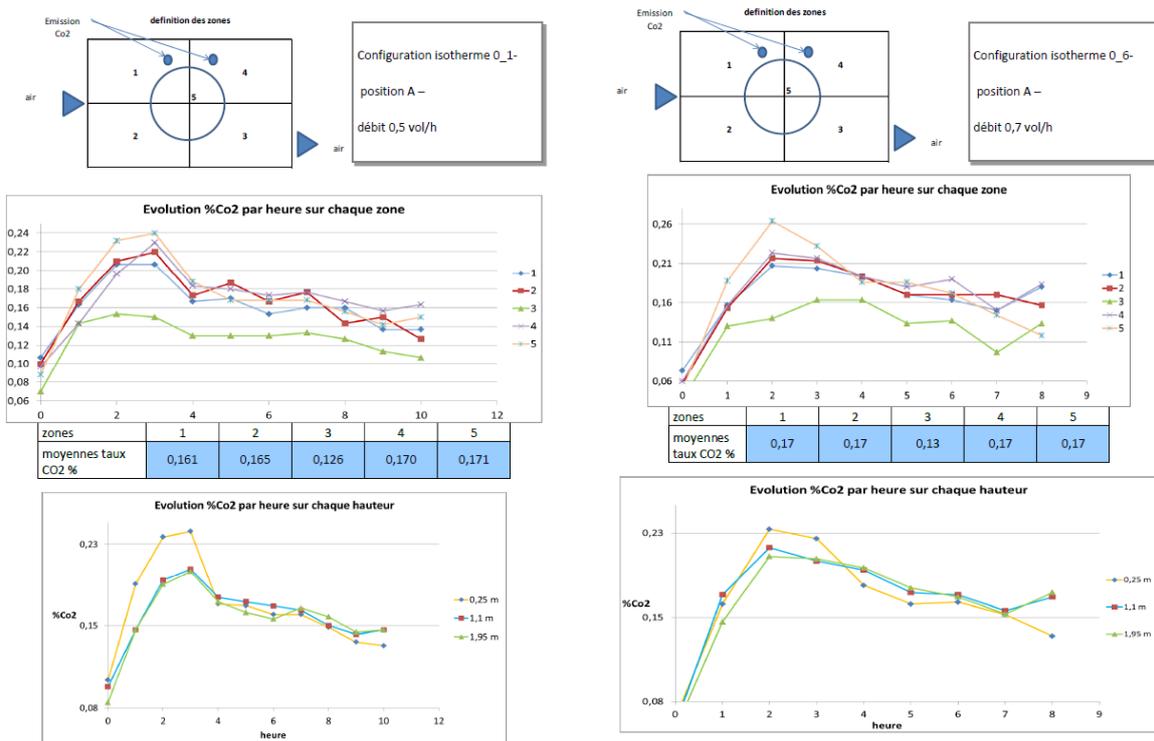
ESSAIS AVEC CHAUFFAGE

Numéro configuration	Position de l'émission du CO <sub>2</sub> (m)	Débit d'émission du CO <sub>2</sub> (l/min)	Aspiration (vol/h)	Position du chauffage	Période (h)
Conf. 1	A	0,7 l/min	0.5	P1	8 h
Conf. 2	A	0,7 l/min	1.0	P1	8 h
Conf. 3	A	0,7 l/min	0.5	P2	8 h
Conf. 4	A	0,7 l/min	1.0	P2	8 h
Conf. 5	B	0,7 l/min	0.5	P1	11 h
Conf. 6	B	0,7 l/min	1.0	P1	8 h
Conf. 7	B	0,7 l/min	0.5	P2	8 h
Conf. 8	B	0,7 l/min	1.0	P2	8 h

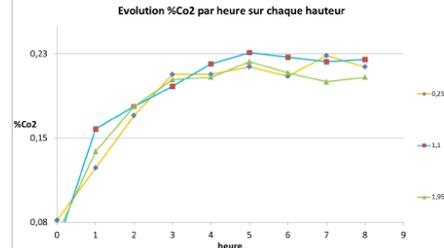
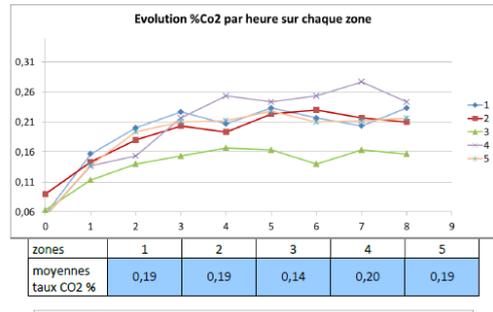
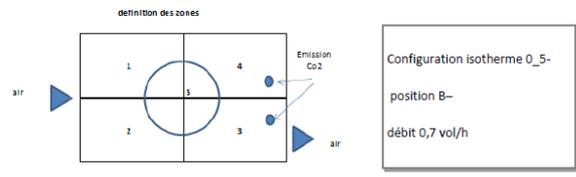
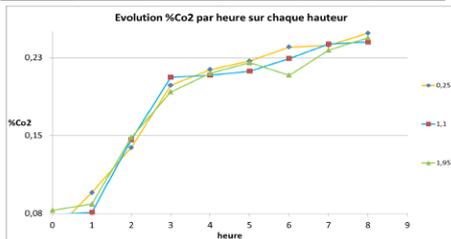
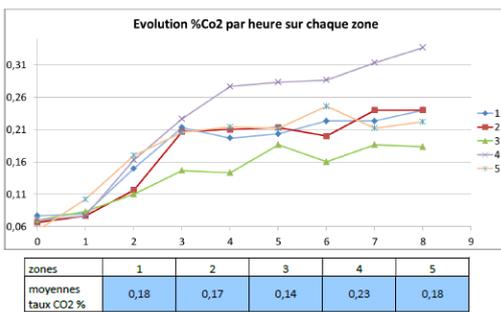
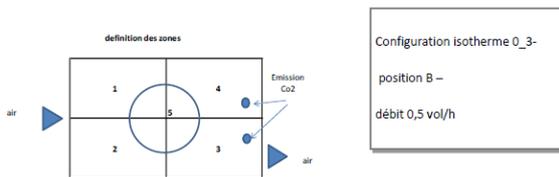
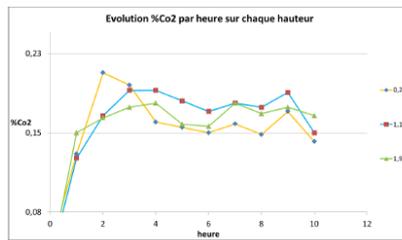
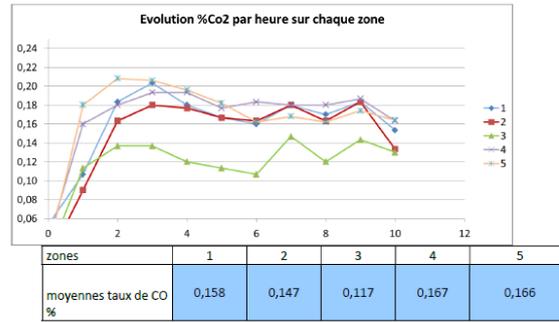
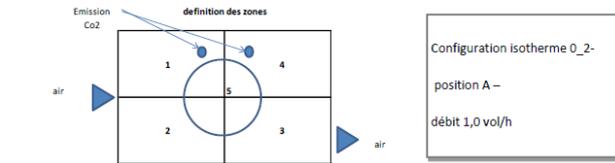
### 3.4. Résultats

#### a. Evolution du taux de CO<sub>2</sub> dans la pièce, sans chauffage

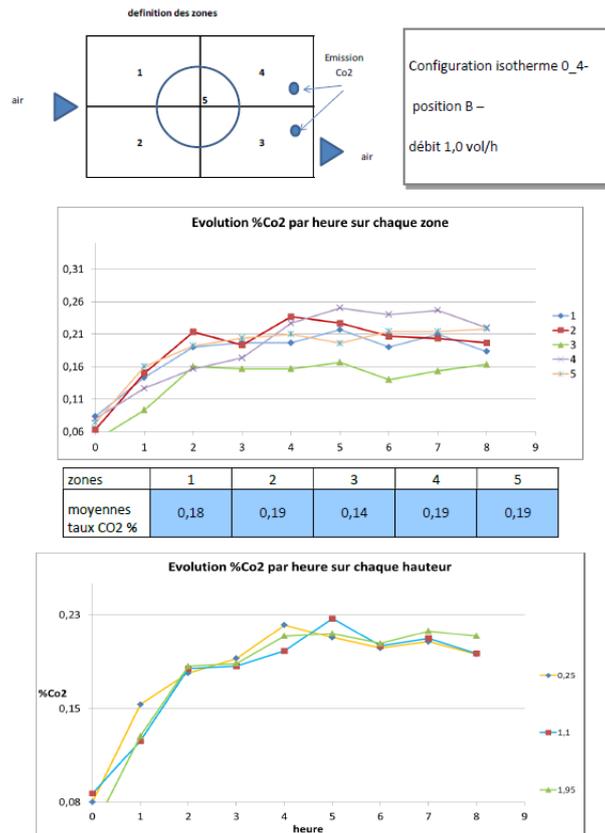
Graphiques d'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> pour le débit de 0.5, 0.7 et 1 vol/h



Avec ce débit réglementaire et 2 personnes dans une pièce, on atteint des taux de CO2 supérieure à 2000ppm au bout de 2h, pour redescendre et se stabiliser autour de 1500ppm au bout de 8h.



Les concentrations augmentent régulièrement jusqu'à atteindre en moyenne 2000ppm au bout de 8h.



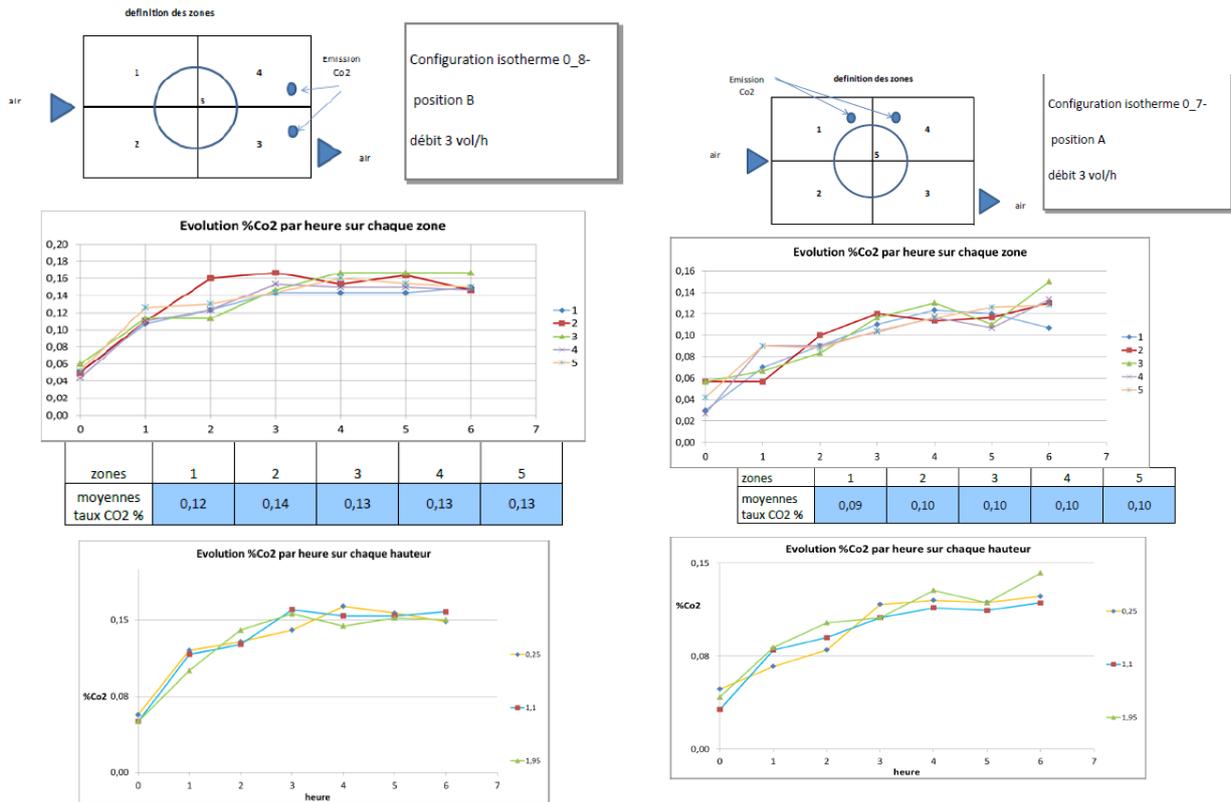
On observe une distribution de CO<sub>2</sub> variable en fonction de la position des sources d'émission :

- En position A, loin de la sortie d'air, on observe un pic de concentration vers 2H (entre 2100 et 2400 ppm) pour se stabiliser à partir de 5h autour de 1450 ppm pour débit de 1 vol/h.
- En position B, proche de la sortie d'air, il n'y a pas d'accumulation de CO<sub>2</sub> qui sort rapidement dans la pièce avec une stabilisation à partir de 4h pour débit de 1 vol/h -1900 ppm, de 6,5 h pour débit de 0,5 vol/h – 2300 ppm), et de 5 h pour débit de 0,7 vol/h – 2110 ppm).

**Le niveau de CO<sub>2</sub> moyen, plus stable en position B est cependant plus élevé que la configuration A. La position de la sonde influence donc la concentration en CO<sub>2</sub> dans la pièce.**

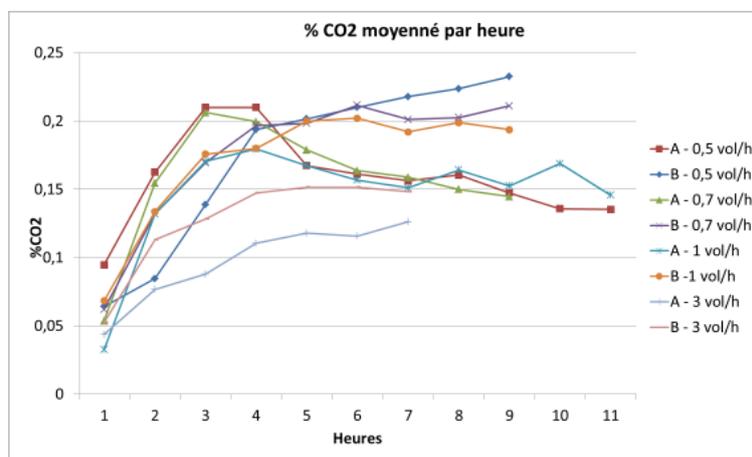
**En revanche, on observe que la zone 3, proche de la sortie, est toujours la mieux ventilée.** D'autre part, les concentrations relevées sont, dans tous les cas, plus élevées que l'étude précédente avec une seule source de CO<sub>2</sub>. Plus il y a de personnes dans une pièce, plus les taux de CO<sub>2</sub> sont élevés.

**Graphiques d'évolution de la concentration de CO2 pour le débit de 3 vol/h :**



**L'accumulation de CO2 disparaît**, le brassage de l'air s'effectue dans toute la pièce avec des débits bien plus élevés et ce pour les 2 configurations (4 h pour débit de 3 vol/h – 1500 ppm en position B et 1200 ppm en position A, toujours moins élevé). **Les concentrations en CO2 diminuent** également avec les taux de renouvellement d'air plus importants. Pour toutes les expérimentations, on observe une **concentration plus importante au sol**, dû à la masse volumique de ce gaz supérieure à celle de l'air qui tombe au sol.

Contrairement aux débits plus faibles, la position des émissions de CO2 n'influence plus trop la distribution des concentrations, toute la pièce est bien brassée. Effectivement, pour un débit de 3 vol/h (configurations A et B), on n'arrive plus à détecter de zone moins ventilée.



**Figure 14** Comparaison entre l'évolution de CO2 de la configuration A et B pour les débits 0,5 vol/h, 0,7 vol/h , 1 vol/h et 3 vol/h

Nous avons aussi comparé les acquisitions avec les lois théoriques de diffusion des polluants dans un volume (Figure 12). Cette opération nous permet d'évaluer l'exactitude des résultats expérimentaux. La loi théorique prend en compte une émission continue avec diffusion uniforme et homogène dans un volume de mêmes dimensions que la pièce et avec des taux de renouvellement d'air identiques : à 0,5 vol/h, 0,7 vol/h, 1 vol/h et 3 vol/h. Bien évidemment il est impossible de trouver exactement les mêmes valeurs mais, les moyennes des acquisitions s'en rapprochent beaucoup surtout pour la configuration B. En revanche l'expérimentation A présente des niveaux de CO<sub>2</sub> plus bas que la configuration B et les lois théoriques (pour débit < 3vol/h), mais la courbe de concentration dans le temps est assez singulière (pour débit < 3vol/h). Cette constatation est répétée dans les essais avec débit variable, ce qui nous conforte dans la fiabilité des résultats. En effet on remarque que quand les débits de renouvellement sont plus importants, le taux de CO<sub>2</sub> diminue.

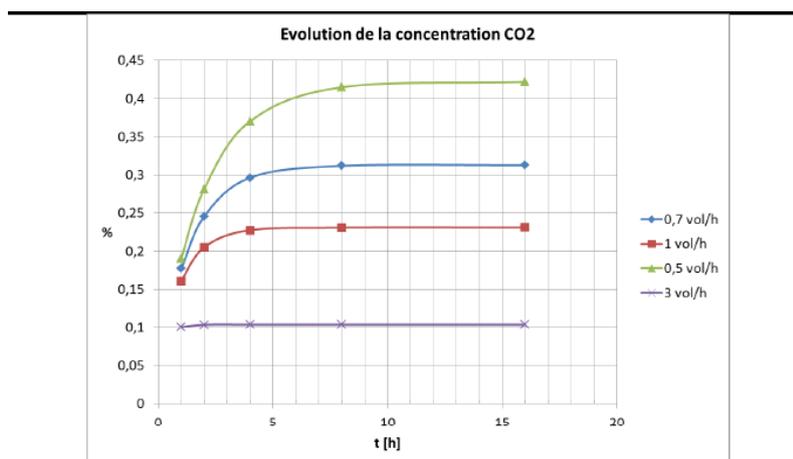
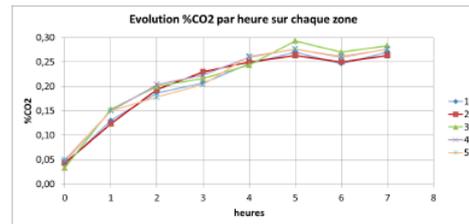
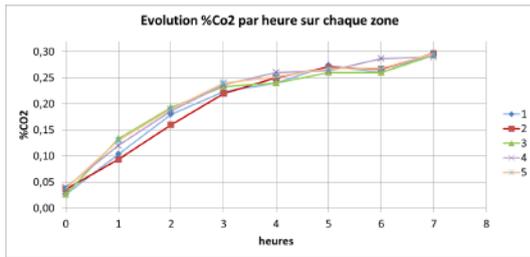
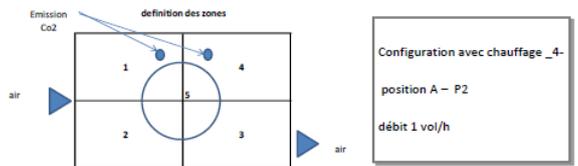
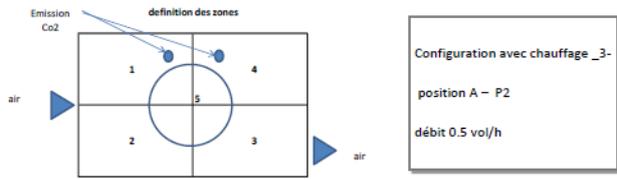


Figure 12 Évolution de la concentration dans le temps à différents débits de renouvellement d'air selon un calcul théorique. Pour assurer un niveau de ppm < 1000 (ou 0.1 %) il faudrait avoir au moins 3 vol/h pour une pièce de cette dimension.

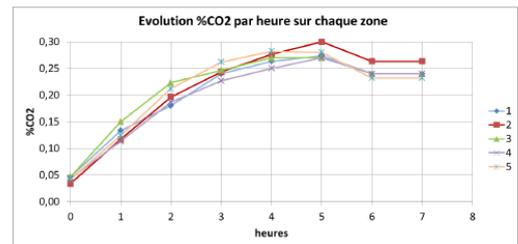
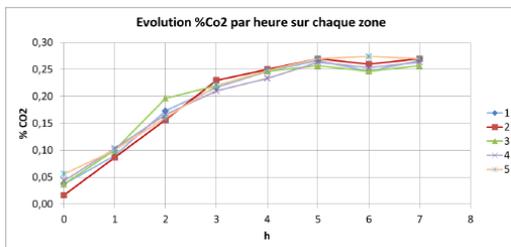
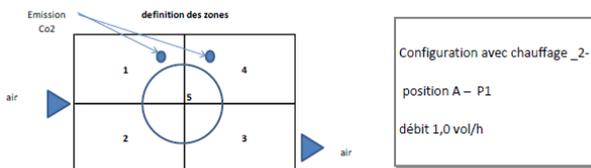
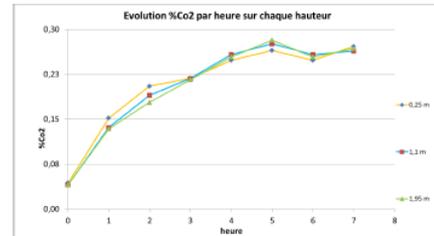
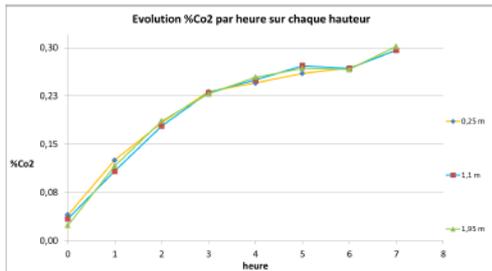
**Les 1000 ppm ne semblent atteints qu'avec un débit de 3vol/h. Pour des débits plus faibles, on a des concentrations en CO<sub>2</sub> supérieures à ce « seuil ».**

**b. Evolution du taux de CO<sub>2</sub> dans la pièce, avec chauffage**



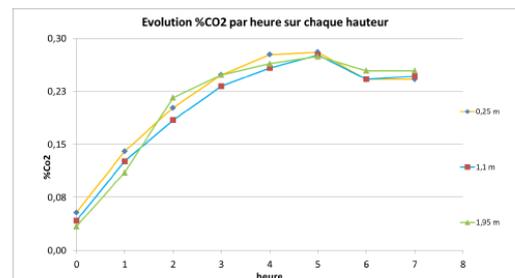
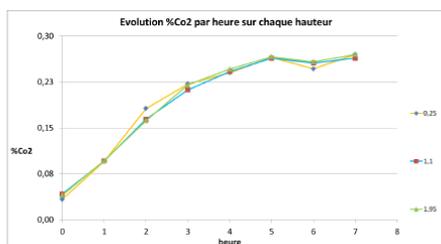
zones	1	2	3	4	5
moyennes taux de CO %	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21

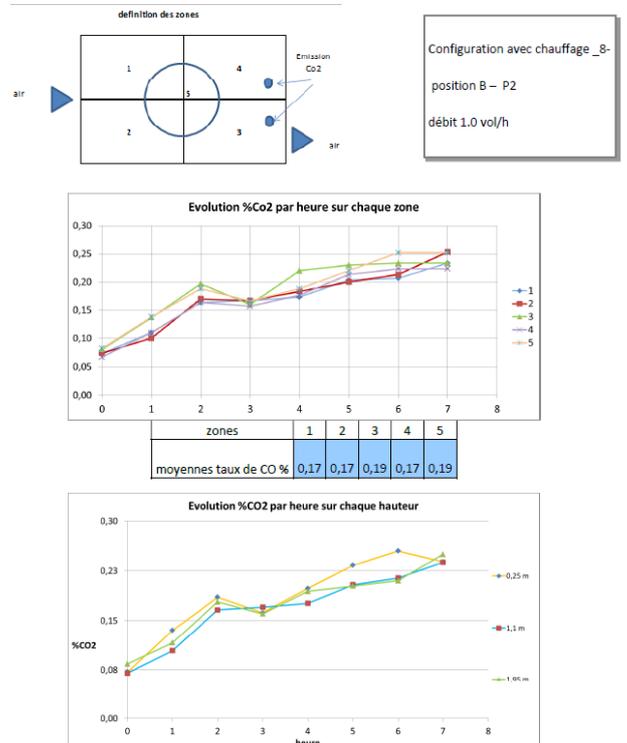
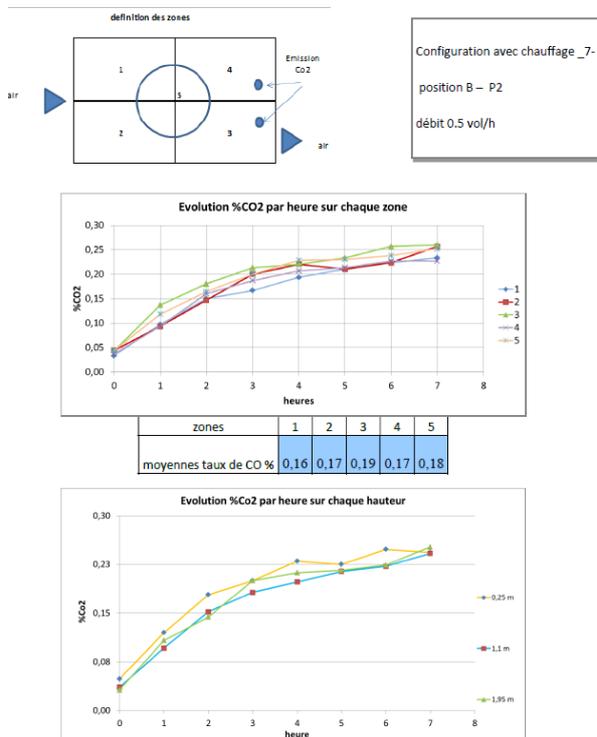
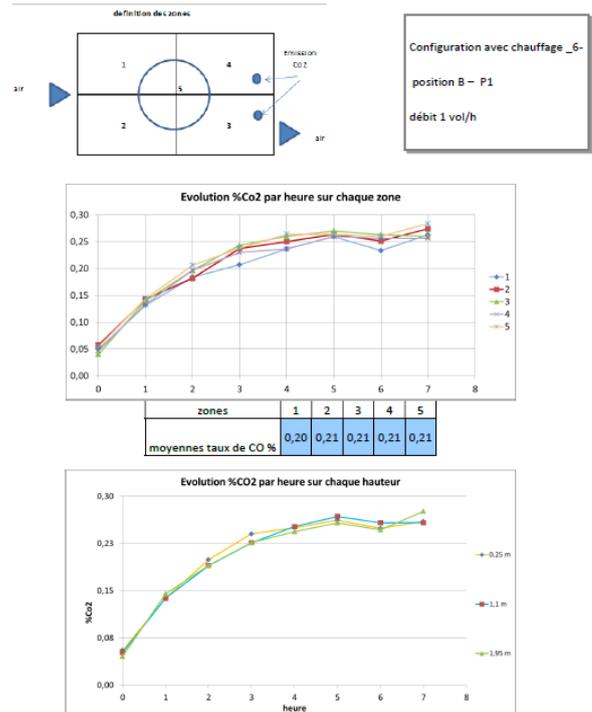
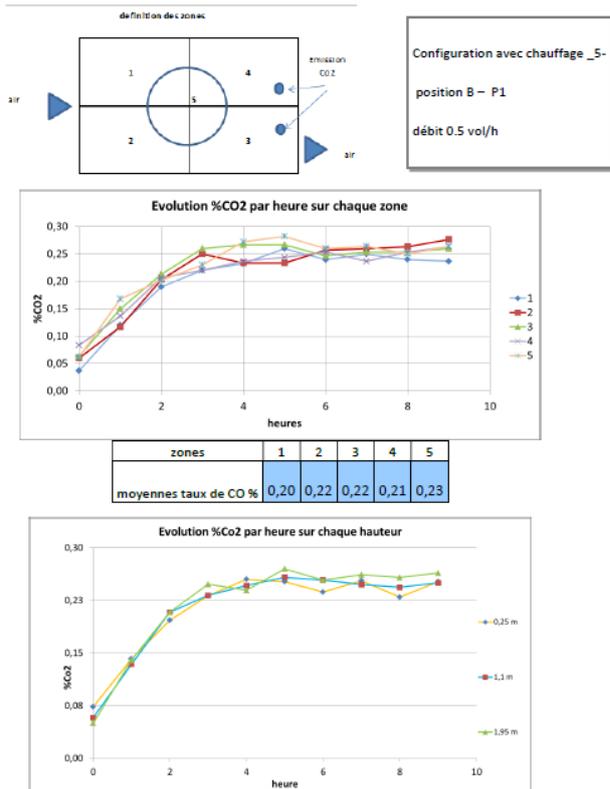
zones	1	2	3	4	5
moyennes taux de CO %	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21



zones	1	2	3	4	5
moyennes taux de CO %	0,19	0,19	0,20	0,19	0,20

zones	1	2	3	4	5
moyennes taux CO <sub>2</sub> %	0,20	0,21	0,21	0,20	0,21





On constate très peu de différence entre les différentes configurations en raison de la présence du chauffage. En effet, le chauffage joue le rôle de moteur des écoulements d'air et assure donc un brassage de l'air et du CO2. On n'observe pas de stratification, les taux de CO2 sont similaires au sol, au plafond ou à mi-hauteur. A noter, qu'au-dessus du lit, on observe une accumulation toujours plus importante de CO2 car c'est une zone moins bien brassée.

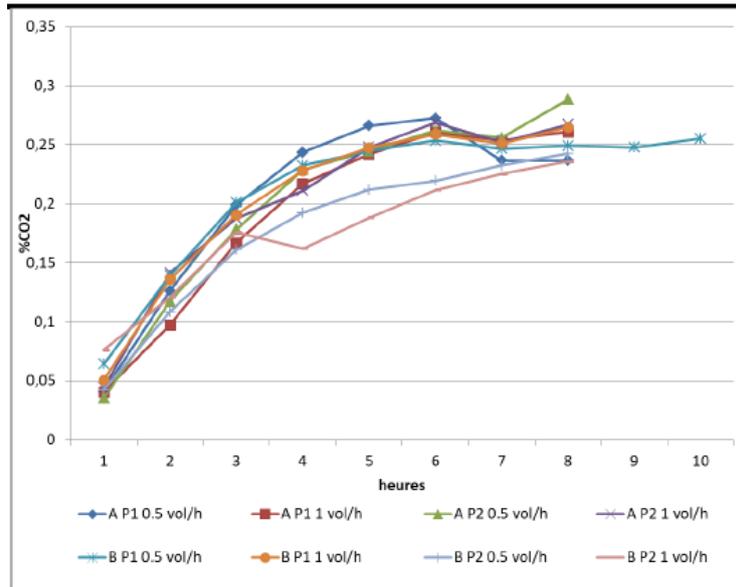


Figure 20 Comparaison des moyennes de CO<sub>2</sub> par heure de chaque configuration

L'effet de l'accumulation du CO<sub>2</sub> dans le temps avec le pic de concentration remarqué dans la configuration isotherme A, n'est observé que dans cette configuration avec le radiateur en position P1 pour un débit de 0,5vol/h. Le pic de concentration est de 2730 ppm entre 5h et 6h puis il y a une stabilisation à un taux inférieur à 2360 ppm. Cet effet disparaît pour un débit d'extraction de 1 vol/h et dans la position du radiateur P2. Nous avons déjà mis en évidence qu'avec l'augmentation des renouvellements d'air cet effet d'accumulation allait diminuer (dans la configuration isotherme pour un débit = 3 vol/h). On observe le même phénomène avec le chauffage en position P2.

On remarque également que les concentrations en CO<sub>2</sub> sont les plus faibles dans la configuration B avec le chauffage en position P2 pour tout débit.

**c. Identification de zones de stagnation du CO<sub>2</sub> dans la pièce, sans chauffage**

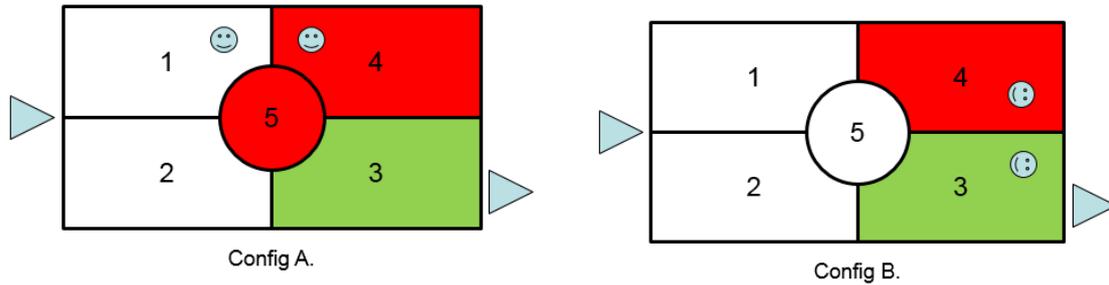
configuration	débit vol/h	Zones	
		sous ventilées	ventilées
Pos A 0_1	0,5	4, 5	3
Pos A 0_2	1	4, 5	3
Pos A 0_6	0,7	4,5	3
Pos A 0_7	3	-	1

configuration	débit vol/h	Zones	
		sous ventilées	ventilées
Pos B 0_3	0,5	4	3
Pos B 0_4	1	4	3
Pos B 0_5	0,7	4	3
Pos B 0_8	3	-	1

Figure 10 Liste des zones avec concentration de gaz supérieure à la moyenne (sous ventilées) et concentration inférieure à la moyenne (ventilées)

- Configuration A et B testées sans chauffage.
- Le taux de renouvellement d'air : 0,5 – 0,7 – 1 volume/heure.

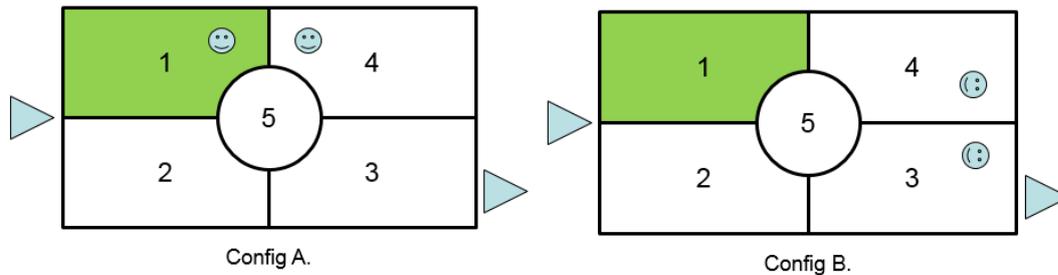


Légende :

- Rouge : Zone sous-ventilée
- Vert : zone la mieux ventilée

La zone 4 dans le coin en haut à droite est la moins ventilée pour les différentes configurations et les différents débits de ventilation testés.

- Configuration A et B testées sans chauffage.
- Le taux de renouvellement d'air : 3 volume/heure.



L'augmentation des renouvellements d'air diminue l'effet d'accumulation de CO2 dans une zone, et cela peu importe l'emplacement du radiateur.

d. Identification de zones de stagnation du CO2 dans la pièce, avec chauffage

n.	configuration	vol/h	chauffage	stabilisation	%CO2 moyen	%CO moyen stabilisé	%CO moyen avant stabilisation
1	A	0,5	P1	6h	0,203	0,237	0,273
2	A	1	P1	5h	0,185	0,27	x
3	A	0,5	P2	6h	0,201	0,29	x
4	A	1	P2	5H	0,203	0,274	x
5	B	0,5	P1	7h	0,214	0,26	x
6	B	1	P1	7h	0,204	0,27	x
7	B	0,5	P2	7h	0,176	0,25	x
8	B	1	P2	7h	0,175	0,24	x

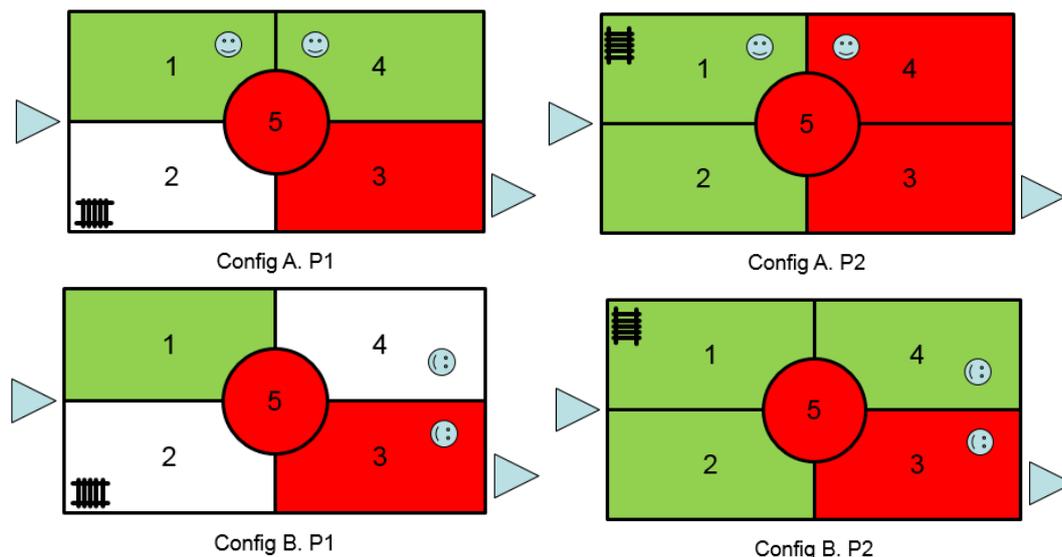
Figure 18 Tableau indiquant pour chaque : les heures indiquant la période pour arriver à la stabilisation, valeurs des taux de CO2 moyens globaux dans la pièce pendant toute la période, valeurs moyens globaux à la stabilisation. Pour la configuration 1, vue qu'on observe le phénomène du pic d'accumulation, nous allons indiquer aussi la valeur maximale du pic (%CO2 moyen avant stabilisation)

n.	configuration	vol/h	chauffage	point avec taux fort	point avec taux moyen	zones sous ventilées	zones ventilées	stabilisation	%CO2 moyen	%CO moyen stabilisé	%CO moyen avant stabilisation
1	A	0,5	P1	1-3-17	5-13	2-3-5	4-1	6h	0,203	0,237	0,273
2	A	1	P1	1-5-7-17	11-13-15	3-5	1-2-4	5h	0,185	0,27	x
3	A	0,5	P2	5	1-11-12-7-3-4	3-4-5	1-2	6h	0,201	0,29	x
4	A	1	P2	5-13-17	1-7-11	3-4-5	1-2	5H	0,203	0,274	x
5	B	0,5	P1	1-5-7-17	11-13-15	2-5-3	1-4	7h	0,214	0,26	x
6	B	1	P1	5-11	1-15-17	2-3-4-5	1-	7h	0,204	0,27	x
7	B	0,5	P2	15-13	1-3-11-17	3-5	1-2-4	7h	0,176	0,25	x
8	B	1	P2	15-18	5-11-8-12-17-8	3-5	1-2-4	7h	0,175	0,24	x

Figure 19 Analyse des points et des zones avec un fort taux de CO2 (zones sous ventilées), zones avec un taux plus faible (zones ventilées) et points avec un taux moyen de CO2

En effet on remarque que les zones 3 et 5 sont toujours des zones sous ventilées, et la zone 1 est bien ventilée. Quand le chauffage se trouve en position P2 les zones les mieux ventilées sont la 1 et la 2 (pour la configuration A et B). Les points avec les taux les plus forts peuvent être situés dans les zones sur ou sous ventilées.

- Configuration A et B testées avec chauffage.
- Positions 1 et 2 pour le radiateur.
- Le taux de renouvellement d'air : 0,5 – 0,7 – 1 volume/heure.



**L'augmentation des renouvellements d'air permet de diminuer l'effet d'accumulation de CO2. La configuration B avec le radiateur en position P2 semble la plus favorable quel que soit le débit. Les zones 3 en bas à droite et 5 au centre sont les moins ventilées.**

La configuration avec un taux de renouvellement d'air à 3 vol/heure n'a pas été testée, s'éloignant trop de la réalité. On a effectivement montré dans les tests précédents que des débits élevés permettaient d'améliorer efficacement le brassage de l'air dans la pièce et diminuer les concentrations de CO2.

### 3.5. Conclusion

**Sans chauffage**, la configuration A est plus favorable et les zones 5 au centre ou 4 dans le coin haut sont les moins bien ventilées. La zone 3 vers la sortie d'air est bien ventilée.

**Avec chauffage**, la meilleure configuration est la B avec chauffage en position P2 et les zones 3 et 5 sont toujours sous ventilées, et la zone 1 est bien ventilée.

On constate que les zones et les configurations les meilleures pour les essais isothermes sont différentes pour ceux non-isotherme.

Les tests avec un débit de 3vol/h montrent un brassage efficace de l'air dans la pièce en diminuant les concentrations de CO2.

On observe aussi que dans toutes expérimentations il y a une concentration du CO2 plus importante au sol, dû à la masse volumique de ce gaz supérieure à celle de l'air (sa masse volumique à 20°C est de 1,83 kg/m<sup>3</sup> contre 1,22 kg/m<sup>3</sup> de l'air).

## 4. Présentation de l'étude n°4

L'étude sur la diffusion du CO<sub>2</sub> a montré qu'au bout de 7/8h, dans un logement équipé ou non d'une VMC simple flux et occupée ou non par une ou deux personnes, il est nécessaire d'ouvrir les fenêtres pour évacuer le CO<sub>2</sub> accumulé, et les autres polluants, et renouveler l'air. Qu'en est-il pour une chambre occupée par deux personnes et équipée d'une ventilation double flux ? Les résultats sont-ils similaires ou bien les concentrations de CO<sub>2</sub> sont-elles plus fortes et atteintes plus rapidement ? Pour analyser ce phénomène, QUALITEL a missionné le Laboratoire Aérodynamique Eiffel pour mener une étude complémentaire portant sur le comportement de l'air en présence de deux personnes, en faisant varier la position du radiateur et des sources de CO<sub>2</sub> en présence d'une ventilation mécanique double flux.

Pour mener à bien cette étude, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a utilisé la maquette initiale en procédant à des ajustements pour simuler la présence de deux personnes dans la pièce avec un système de ventilation double flux.

### 4.1. Caractéristiques

- Pièce de type chambre, taille réelle de 10 m<sup>2</sup> (2,75m x 3,65m x 2,2m, soit 22m<sup>3</sup>).
- Cloison simulant une porte intérieure avec détalonnage de 2 cm faisant office d'entrée ou de sortie d'air.
- Entrée d'air située au plafond à 50cm du mur.
- Système de chauffage : modèle de radiateur électrique convectif de 1000 Watts.
- Différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la pièce : 10°C maximum.

De nouveaux éléments :

- 2 émissions de CO<sub>2</sub> à 65cm du sol avec un débit éjecté de 0.7l/min<sup>4</sup>.
- Gabarit de 140x190x55cm modélisant un lit.
- 2 positions différentes de radiateur : P1 et P2.
- Taux de renouvellement d'air fixé à 0.5 vol/h (réglementaire).
- VMC double flux de type PRIMOCOSY HR BP de la Société ATLANTIC (rendement 90%).

La VMC double flux aspire l'air vicié intérieur par le détalonnage de la porte. Cet air passe alors dans un échangeur thermique avant d'être rejeté. De l'air neuf est aspiré de l'extérieur passe dans l'échangeur et est réchauffé grâce à l'air vicié plus chaud (cas essais chauffage dans la pièce) puis est injecté dans la pièce via un diffuseur incrusté dans le plafond.

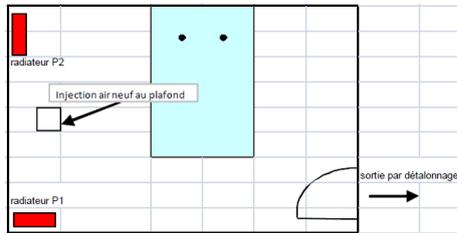


<sup>4</sup> Le débit éjecté par expiration par personne est compris entre 15 et 25 l/h (environ 0,3l/min)

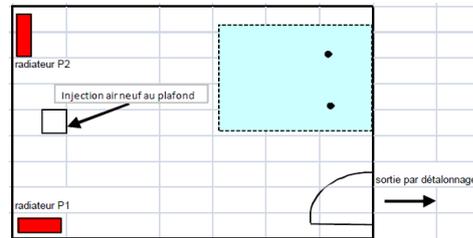
## 4.2. Méthodologie

Cette maquette permet de reproduire la configuration d'une chambre avec une porte et une VMC double flux, occupée par 2 personnes dormant dans la pièce. Le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a procédé à l'émission de CO<sub>2</sub> au moyen de deux sources placées en tête de lit sur simuler ces présences.

Configuration A :



Configuration B :



## 4.3. Mesures

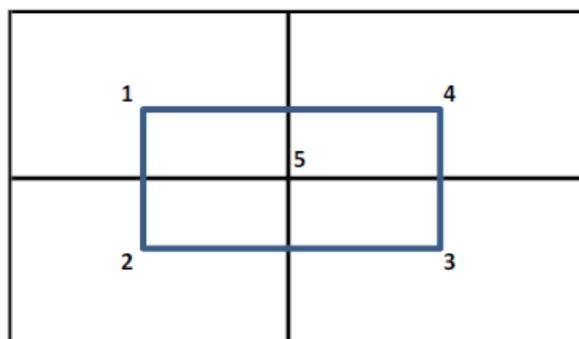
L'étude a consisté à mesurer les taux de CO<sub>2</sub> à différents endroits de la pièce :

- Selon 6 configurations : variation des positions du radiateur et du lit.
- 40 sondes de température (thermocouples) et 19 sondes de mesures de gaz réparties dans la pièce.
- Période d'acquisition de 8 heures.

**Les tableaux suivants représentent l'ensemble des configurations testées :**

N°	Config.	Renouvellement d'air	Position radiateur
1	A	0,5 vol/h	Iso-T
2	B	0,5 vol/h	Iso-T
3	A	0,5 vol/h	P1
4	A	0,5 vol/h	P2
5	B	0,5 vol/h	P1
6	B	0,5 vol/h	P2

La chambre d'essais est sectorisée en 5 zones :

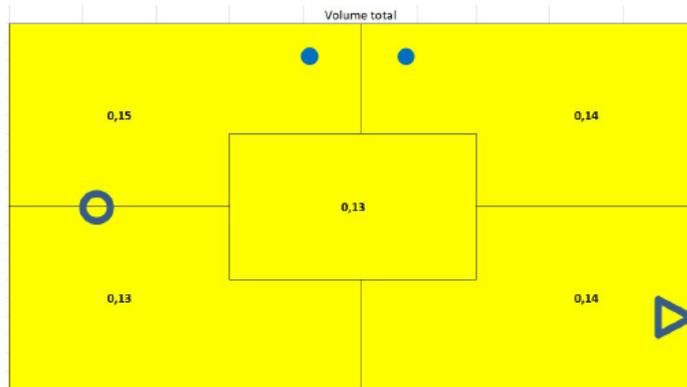


### 4.4. Résultats

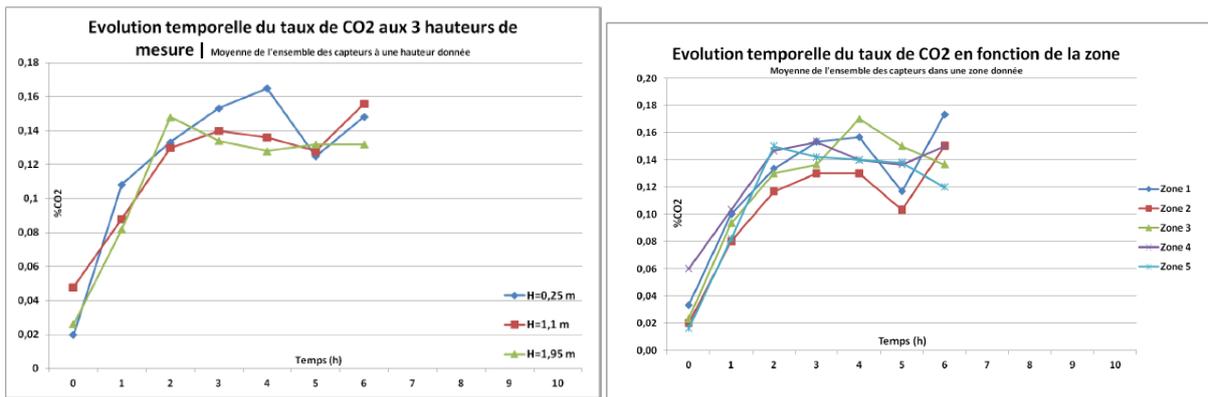
#### a. Evolution du taux de CO<sub>2</sub> dans la pièce, sans chauffage

##### **Configuration isotherme 1- position A – Taux de renouvellement 0,5 vol/h :**

La figure suivante représente cette fois-ci la concentration de CO<sub>2</sub> par zone mais moyennée sur l'ensemble des 3 hauteurs précédentes. Il s'agit donc de zones s'étendant du sol au plafond.

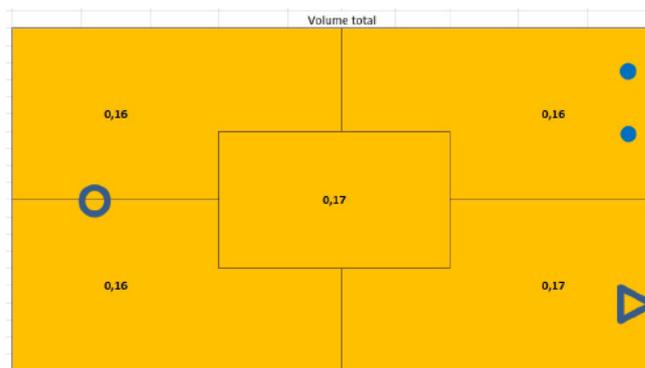


Les graphiques suivants présentent l'évolution temporelle du taux de CO<sub>2</sub> aux 3 tranches de hauteur différentes et selon les différentes zones

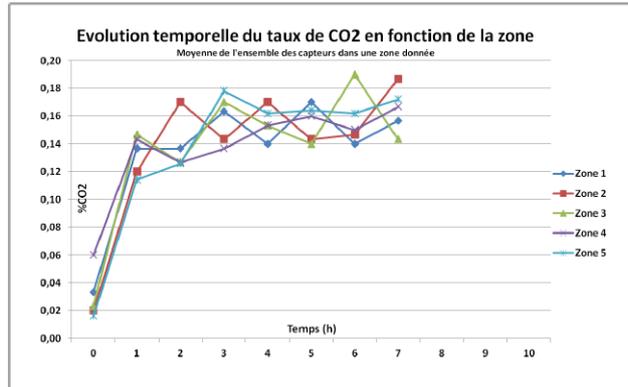
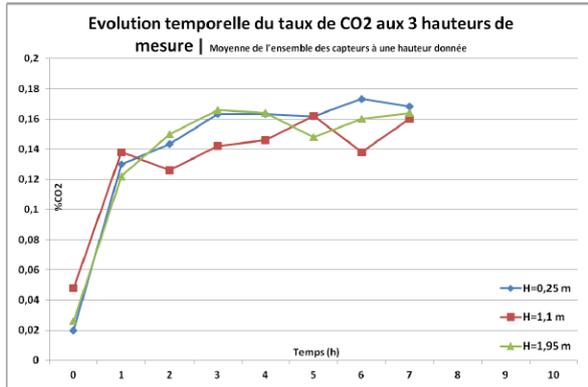


On s'aperçoit que la stabilisation s'établie après environ 2 h, avec des concentrations plus ou moins élevées en fonction des zones.

##### **Configuration isotherme 2- position B – Taux de renouvellement 0,5 vol/h :**



On observe des concentrations en CO<sub>2</sub> plus importantes dans cette configuration B par rapport à la A.



On constate une stabilisation du CO2 au même moment (environ 2h), avec cependant des concentrations plus élevées dans l'ensemble pour la configuration B et une instabilité plus marquée entre les différentes zones.

Le tableau ci-dessous à gauche présente les moyennes de CO2 pour l'ensemble de la chambre d'essais sur les 3 dernières heures. Celui de droite présente le temps de stabilisation de la concentration de CO2 pour l'ensemble de la chambre d'essais.

Configuration	A	B	Configuration	A	B
Moyenne %CO <sub>2</sub>	0,131 %	0,158 %	Stabilisation (h)	2 h	3 h

La concentration de CO2 est environ 20 % plus importante dans la configuration B que dans la configuration A en moyenne. Et il ne semble pas exister de dépendance à ce temps lié à la position dans la chambre d'essais.

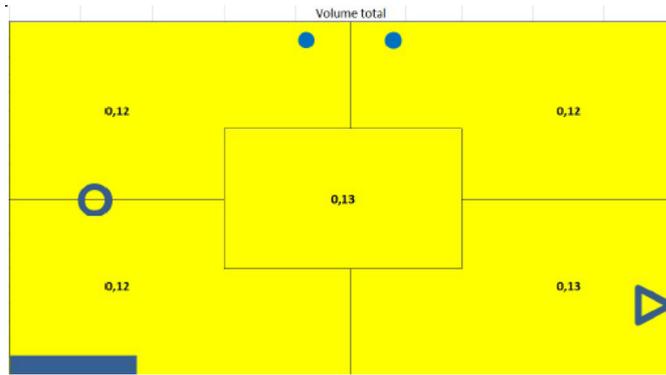
Le tableau ci-dessous présente le maximum de concentration de CO2 atteint en un point sur l'ensemble de la période testée ainsi que sa localisation dans la chambre d'essais et l'heure d'apparition :

Configuration	A	B
Maximum	0,24 %	0,24 %
Emplacement	H=0,25 m   Sortie	H=0,25 m   Centre
Heure d'apparition	4 h	3 h

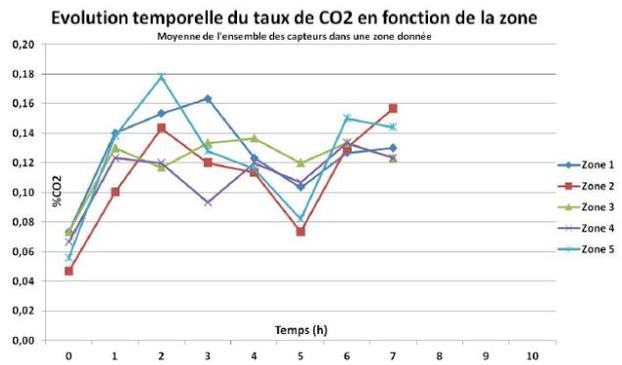
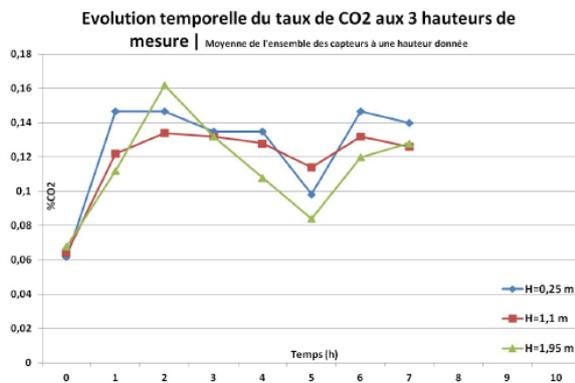
Le maximum atteint est le même dans chaque configuration et il se situe près du sol. La configuration B avec les injecteurs de CO2 plus proche du détalonnage admet des concentrations de CO2 en moyenne plus importantes. **Il paraît donc préférable de favoriser la configuration A.**

**b. Evolution du taux de CO<sub>2</sub> dans la pièce, avec chauffage**

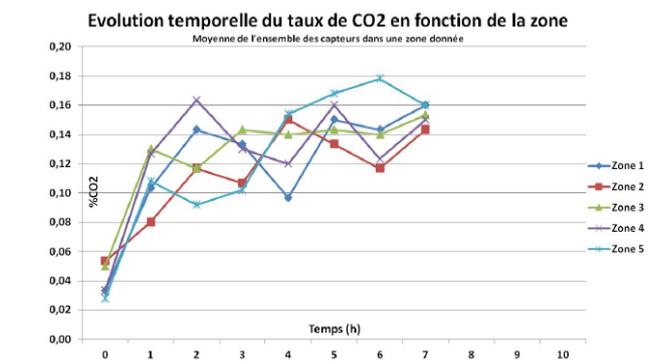
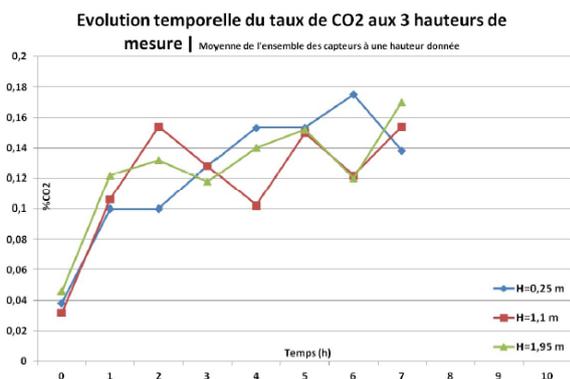
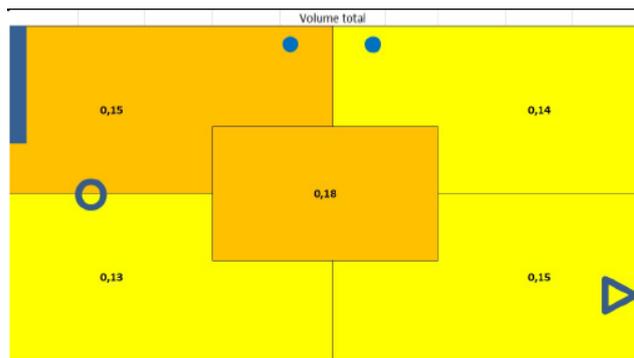
**Configuration chauffage 3- position A –P1- Taux de renouvellement 0,5 vol/h :**



Avec chauffage en position P1, les concentrations sont un peu plus faibles dans la configuration A.



**Configuration chauffage 4- position A –P2- Taux de renouvellement 0,5 vol/h :**



On s'aperçoit que les résultats sont moins bons, surtout près du sol, où on peut atteindre 0,24% CO<sub>2</sub> au milieu de la pièce (zone 5). Cette zone est donc la moins bien ventilée.

### **Confrontations des essais isothermes et non isothermes en position A :**

Le tableau ci-dessous présente les moyennes de CO<sub>2</sub> pour l'ensemble de la chambre d'essais sur les 3 dernières heures :

Configuration	A	A P1	A P2
Moyenne %CO <sub>2</sub>	0,131 %	0,12 %	0,149 %
Ecart relatif à A	[-]	-8,4 %	+13,7 %

En régime stationnaire, il existe une position du chauffage qui minimise en moyenne la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'ensemble de la chambre d'essais. C'est la position P1. La position P2 quant à elle augmente la concentration d'environ 14 % par rapport au cas non isotherme et d'environ 25 % par rapport à la position P1 du chauffage.

Le tableau ci-dessous présente le temps de stabilisation de la concentration de CO<sub>2</sub> pour l'ensemble de la chambre d'essais :

Configuration	A	A P1	A P2
Stabilisation (h)	2 h	2 h	3-4 h

Le tableau ci-dessous à gauche représente le coefficient CH<sup>5</sup> pour chaque configuration. Le tableau de droite présente la fraction du volume d'essais dont le taux de CO<sub>2</sub> est supérieur à 0,2 %.

Configuration	A	A P1	A P2
C <sub>H</sub> (%)	7,4 %	2,2 %	5,9 %

Configuration	A	A P1	A P2
Fraction > 0,2 %	7 %	4,6 %	4,6 %

La position du chauffage P1 permet la meilleure homogénéisation de la concentration de CO<sub>2</sub>. Dans la position P2, le CO<sub>2</sub> s'accumule dans les zones 1,4 et 5 près du sol et dans les zones 2 et 3 près du plafond. Tandis que les configurations avec chauffage admettent une part de %CO<sub>2</sub>>0,2 % inférieure au cas non isotherme.

Le tableau ci-dessous présente le maximum de concentration de CO<sub>2</sub> atteint en un point sur l'ensemble de la période testée ainsi que sa localisation dans la chambre d'essais et l'heure d'apparition :

Configuration	A	A P1	A P2
Maximum	0,24 %	0,29 %	0,33 %
Emplacement	H=0,25 m   Sortie	H=0,25 m   Centre	H=0,25 m   Centre
Heure d'apparition	4 h	2 h	6 h

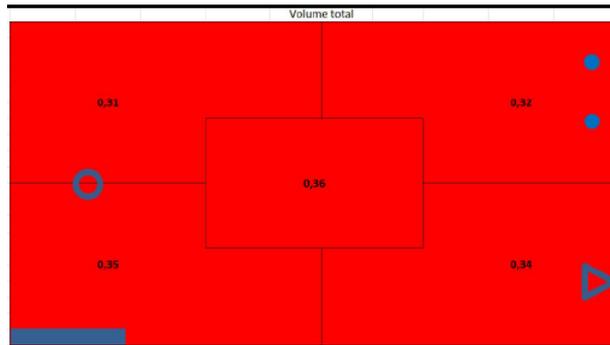
<sup>5</sup> Coefficient d'homogénéité spatiale de la concentration de CO<sub>2</sub> dans la chambre d'essais défini par :  $CH = 100 * \sigma(\%CO_2 / \text{moy, zone}) / \%CO_2 / \text{moy, chambre}$

La concentration maximale est atteinte au centre de la pièce près du sol en présence du chauffage.

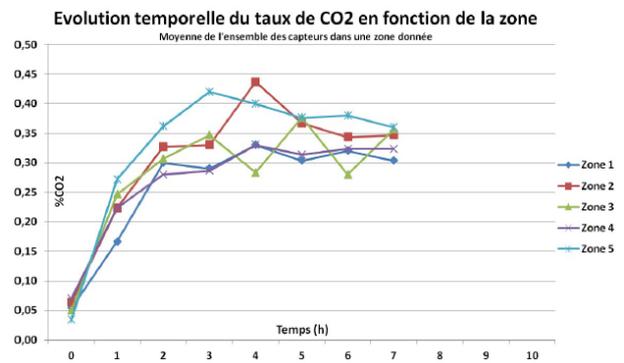
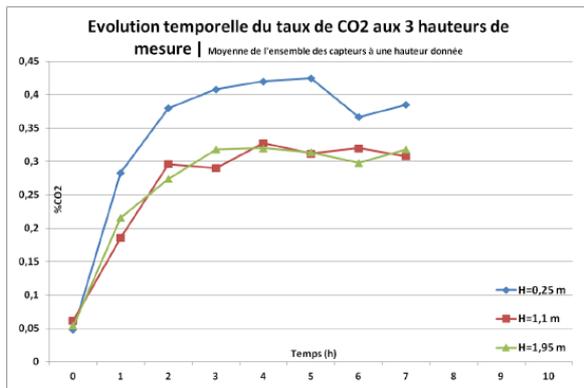
Par rapport au cas isotherme, la présence du chauffage permet de légèrement améliorer l'homogénéité de la concentration du CO2 et également de limiter les zones admettant des taux supérieurs à 0,2 %.

En présence d'un chauffage, la position P1 est à privilégier par rapport à la position P2 avec une concentration moyenne et un maximum au centre 14 % plus faibles.

**Configuration chauffage 5- position B –P1- Taux de renouvellement 0,5 vol/h :**

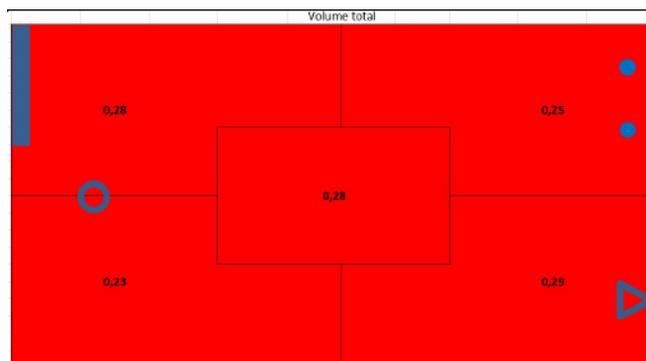


Cette configuration n'est pas à privilégier, les concentrations augmentent, allant bien au-delà de 0,20% CO2.

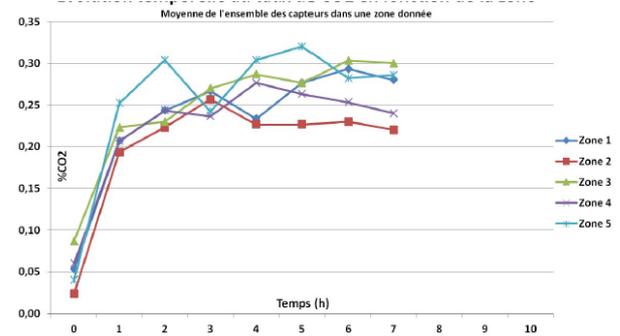
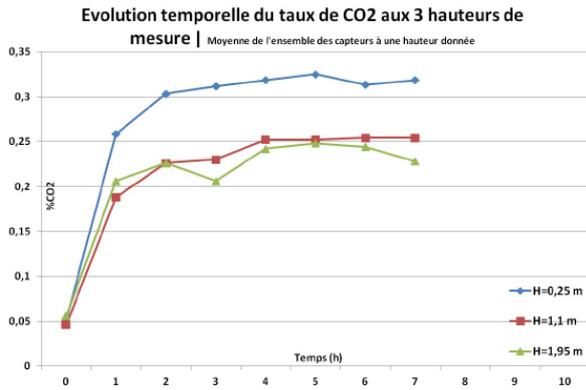


Encore une fois, c'est près du sol et au centre de la pièce que les concentrations sont les plus élevées. Cette zone est la moins bien ventilée.

**Configuration chauffage 6- position B –P2- Taux de renouvellement 0,5 vol/h :**



Les résultats s'améliorent un peu avec le radiateur dans cette position.



On constate également que c'est près du sol et au centre de la pièce que les concentrations sont les plus élevées. Cette zone est la moins bien ventilée.

**Confrontations des essais isothermes et non isothermes en position B**

Le tableau ci-dessous présente les moyennes de CO2 pour l'ensemble de la chambre d'essais sur les 3 dernières heures :

Configuration	B	B P1	B P2
Moyenne %CO <sub>2</sub>	0,158 %	0,327 %	0,263 %
Ecart relatif à A	[-]	+107 %	+66 %

La configuration avec la position P1 du chauffage admet un taux de CO2 moyen 24 % plus important qu'en position P2 et 107 % plus importante que sans chauffage. De manière générale, la présence de chauffage augmente fortement le taux de CO2 avec des moyennes se situant au-delà de 0,2 %. En présence de chauffage, la position P2 est celle limitant la concentration de CO2.

Ces niveaux de concentrations sont également plus élevés que dans la configuration A.

Le tableau ci-dessous présente le temps de stabilisation de la concentration de CO2 pour l'ensemble de la chambre d'essais :

Configuration	B	B P1	B P2
Stabilisation (h)	3 h	4-5 h	4-5 h

La présence de chauffage augmente le temps de stabilisation de la concentration de CO2.

Le tableau ci-dessous à gauche représente le coefficient CH pour chaque configuration et celui de droite, la fraction du volume d'essais dont le taux de CO2 est supérieur à 0,2 %.

Configuration	B	B P1	B P2
C <sub>H</sub> (%)	2,5 %	7,5 %	11,2 %

Configuration	B	B P1	B P2
Fraction > 0,2 %	15 %	78,2 %	71,1 %

La présence de chauffage augmente l'inhomogénéité de la concentration de CO<sub>2</sub> dans la pièce et considérablement la fraction du volume avec un taux de CO<sub>2</sub> supérieur à 0,2 %. Près de 80 % du volume avec le chauffage en position P1.

Le tableau ci-dessous présente le maximum de concentration de CO<sub>2</sub> atteint en un point sur l'ensemble de la période testée ainsi que sa localisation dans la chambre d'essais et l'heure d'apparition :

Configuration	B	B P1	B P2
Maximum	0,24 %	0,66 %	0,47 %
Emplacement	H=0,25 m   Centre	H= 0,25 m   Centre	H= 0,25 m   Centre
Heure d'apparition	3 h	3 h	4 h

Encore une fois, le maximum est atteint au centre de la pièce vers le sol (idem configuration A). Il atteint 0,66 % en P1 soit une augmentation de 175 % par rapport au cas isotherme.

Par rapport au cas isotherme, la présence du chauffage augmente fortement la concentration moyenne de CO<sub>2</sub>. **En présence d'un chauffage, la position P2 est à privilégier.**

#### 4.5. Conclusion

**En présence d'une ventilation double flux, la configuration A est à privilégier par rapport à la B, la concentration maximale est atteinte au centre de la pièce près du sol en présence du chauffage.** Par rapport au cas isotherme, la présence du chauffage permet de légèrement améliorer l'homogénéité de la concentration du CO<sub>2</sub> et également de limiter les zones admettant des taux supérieurs à 0,2 %. En présence d'un chauffage, la position P1 est à privilégier par rapport à la position P2.

La configuration B n'est pas à privilégier, même si c'est la position P2 dans ce cas qui permet de limiter les concentrations en CO<sub>2</sub>.

Par rapport aux résultats avec la ventilation simple flux, on retrouve les mêmes conclusions sans chauffage où la configuration A est plus favorable et les zones 5 au centre ou 4 dans le coin haut sont les moins bien ventilées. La zone 3 vers la sortie d'air est la mieux ventilée. Avec la ventilation double flux et sans chauffage, cela n'est pas significatif mais les concentrations en CO<sub>2</sub> semblent dans l'ensemble moins élevées qu'avec une ventilation simple flux. Ce constat n'est pas valable dans les configurations avec chauffage.

En effet, en présence de chauffage, les conclusions sont très différentes puisqu'avec une ventilation simple flux la meilleure configuration est la B avec le radiateur en position P2 et les concentrations en CO<sub>2</sub> sont dans l'ensemble moins élevées.

## **PARTIE 4 :** **QUEL EST L'IMPACT DU DÉTALONNAGE DE PORTE SUR LA CIRCULATION DE L'AIR DANS UN LOGEMENT ?**

**Objectif :** Etudier le rôle du détalonnage de porte sur l'efficacité de la ventilation d'un logement.

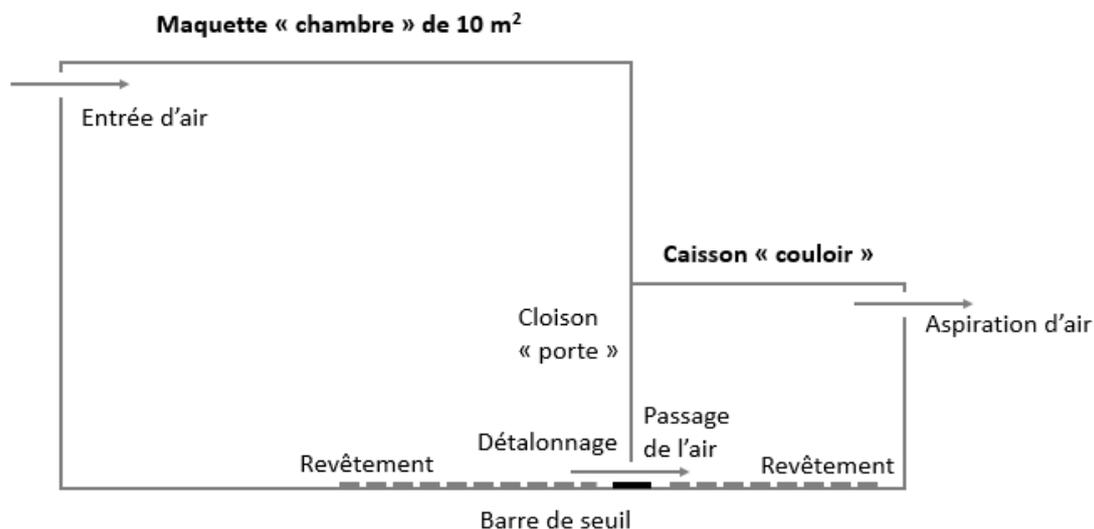
QUALITEL a sollicité le Laboratoire Aérodynamique Eiffel pour réaliser une étude permettant d'analyser l'effet du détalonnage de porte sur la circulation de l'air dans un logement et notamment de déterminer la « perte de charge » du détalonnage (dissipation par frottements de l'énergie mécanique de l'air). L'étude a porté sur la mesure des différences de pression de chaque côté de la porte en faisant varier les hauteurs de détalonnage et les débits de ventilation, et en testant différents revêtements de sol de part et d'autre de la porte.

### **1. Présentation de l'étude**

Pour mener à bien cette étude, le Laboratoire Aérodynamique Eiffel a utilisé la maquette initiale en la complétant avec un caisson simulant une deuxième pièce. Ce caisson a été positionné de l'autre côté d'une paroi de la maquette existante, avec un système de cloison permettant de simuler une porte. La bouche d'extraction d'air a été déplacée dans la deuxième pièce, pour permettre d'étudier la circulation de l'air entre ces deux pièces : entrée d'air, passage de l'air par le détalonnage de porte et aspiration de l'air dans le caisson supplémentaire.

#### **1.1. Caractéristiques**

- Pièce de type chambre, taille réelle de 10 m<sup>2</sup> (2,75m x 3,65m x 2,2m, soit 22m<sup>3</sup>), avec entrée d'air
- Caisson de 1m<sup>3</sup> simulant une pièce attenante, avec une sortie d'air par aspiration, qui permet de faire varier le débit
- Cloison entre les deux faisant office de porte et permettant de faire varier la hauteur du détalonnage (de 0 à 2 cm)
- Ventilateur à débit variable installé dans le caisson à l'opposé du détalonnage de porte permettant de faire varier les taux de renouvellement d'air
- 2 prises de pression de part et d'autre de la porte, environ 50 cm au-dessus du détalonnage



## 1.2. Méthodologie

Cette maquette permet de reproduire une configuration courante dans un logement : une chambre avec une porte donnant sur un couloir. Quatre types de revêtements de sol ont été utilisés pour cette étude, parquet, linoléum, moquette haute et moquette rase. Différentes combinaisons ont été testées :

Côté chambre	Côté couloir
Parquet	Parquet
Moquette rase	Parquet
Moquette haute	Parquet
Linoléum	Linoléum
Moquette rase	Linoléum
Moquette haute	Linoléum
Moquette haute	Moquette haute

## 1.3. Mesures

L'étude a consisté à mesurer les différences de pression  $\Delta p$  de chaque côté de la porte en fonction de :

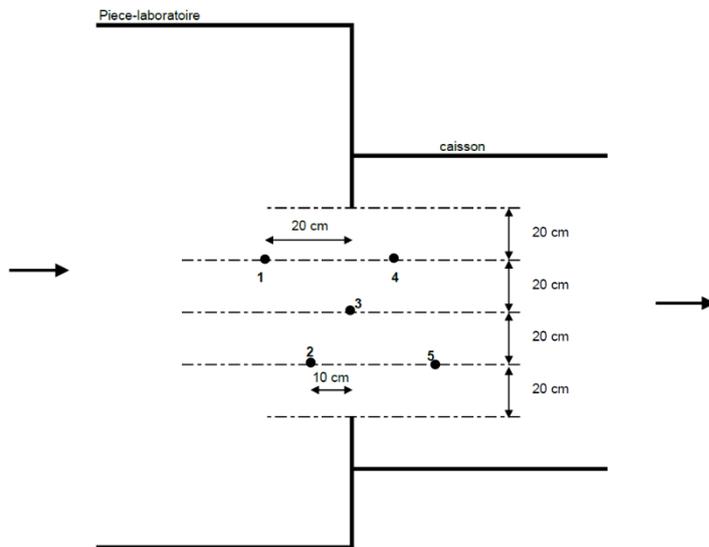
- La hauteur de détalonnage : 0 – 0,5 – 1 – 2 cm.
- Le taux de renouvellement d'air : 0,25 – 0,5 – 1 volume/heure.
- Le type de revêtement de chaque côté de la porte : sol PVC, parquet (nommé plancher dans les graphiques), moquette haute et moquette rase.

Pour chaque essai, sont mesurés :

- La hauteur du détalonnage (en mm).
- La différence de pression entre chaque côté de la porte (en Pa).
- Le taux de renouvellement d'air (en prenant le volume de la pièce en amont).

Les essais, menés en février 2017, ont été complétés par des mesures de vitesses de l'air à proximité immédiate de la porte pour deux configurations de revêtement identique de part et d'autre du détalonnage (linoléum et moquette haute), pour une hauteur de détalonnage de 2 cm et en testant les trois taux de renouvellement d'air étudiés (0,25 – 0,5 – 1 volume/heure).

Des mesures de vitesses ont été réalisées à proximité immédiate du détalonnage en 5 points :

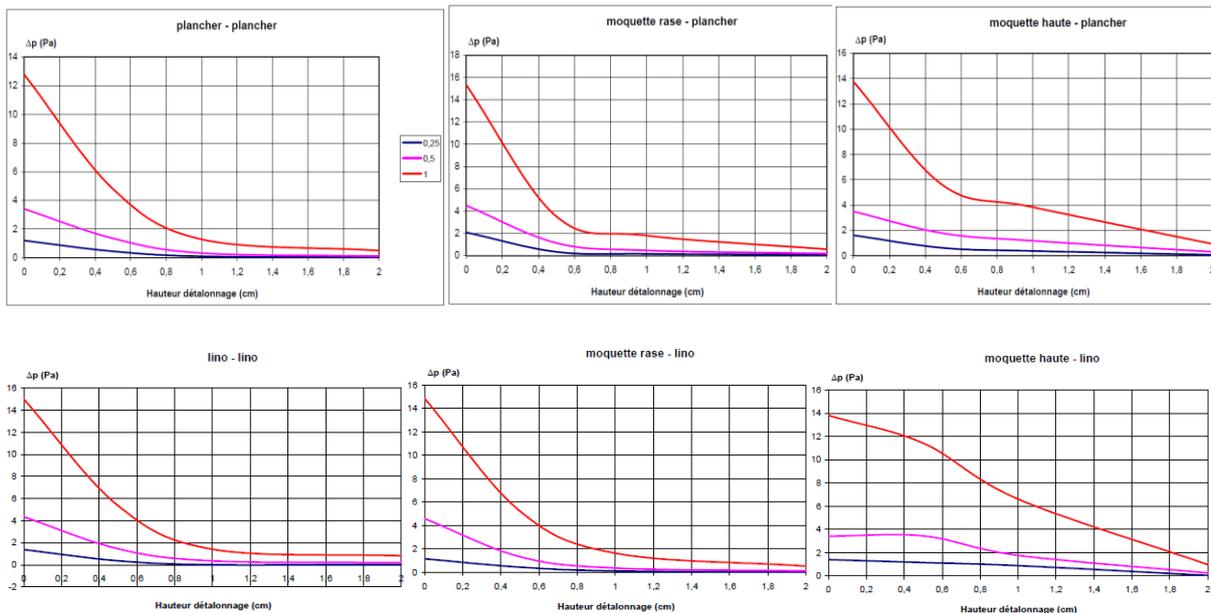


Les valeurs recueillies permettent de déterminer la détérioration des taux de renouvellement d'air des différentes combinaisons de revêtement et de hauteur de détalonnage à partir de la configuration de référence parquet – parquet (configuration où il y a le moins de frottements).

### 1.4. Résultats

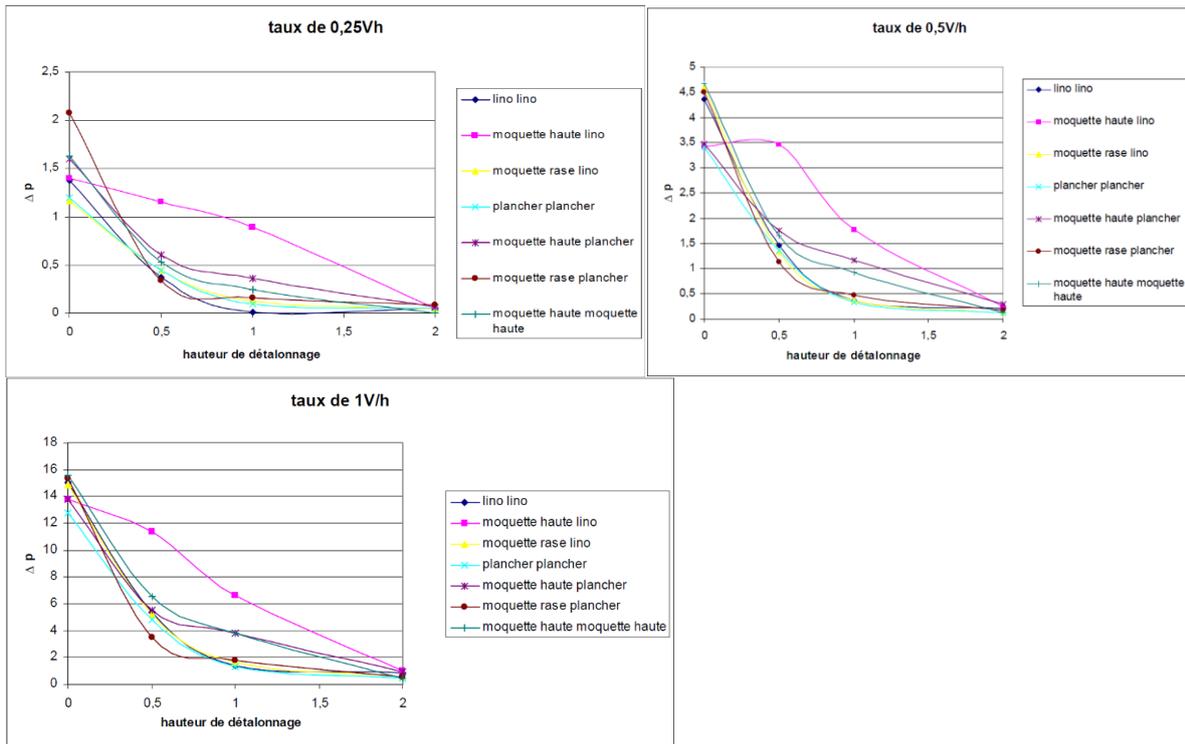
#### a. Perte de charge

En fonction du taux de renouvellement d'air :



Les courbes représentent l'impact de la hauteur du détalonnage sur le différentiel de pression de chaque côté de la porte ( $\Delta p$  en Pa) selon le taux de renouvellement d'air. Plus  $\Delta p$  est élevé et plus la perte de charge est importante. Les tendances sont similaires dans toutes les configurations testées. Quelles que soient les configurations, on constate que la perte de charge  $\Delta p$  diminue plus vite avec un débit plus élevé et entre 0 et 0,8 cm qu'entre 0,8 et 2 cm.

**En fonction de la hauteur de détalonnage :**

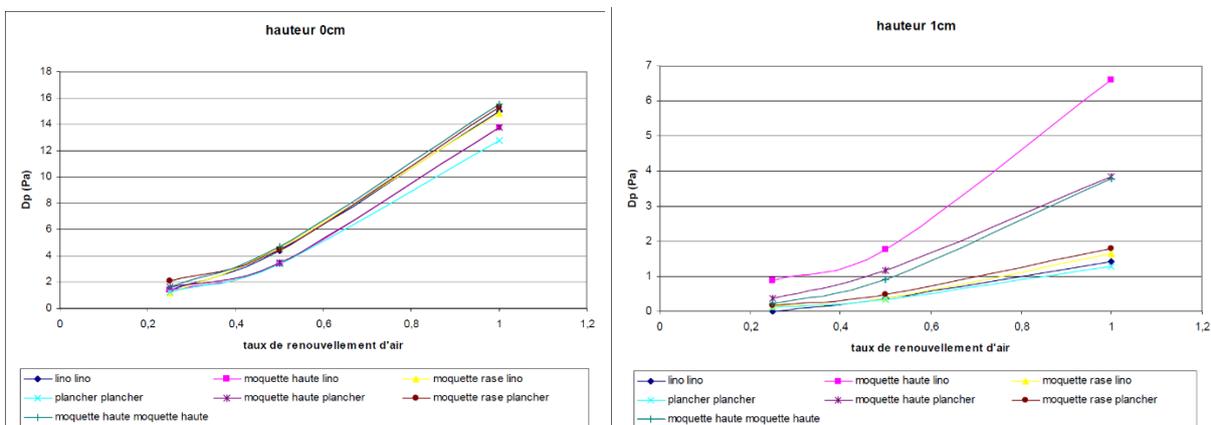


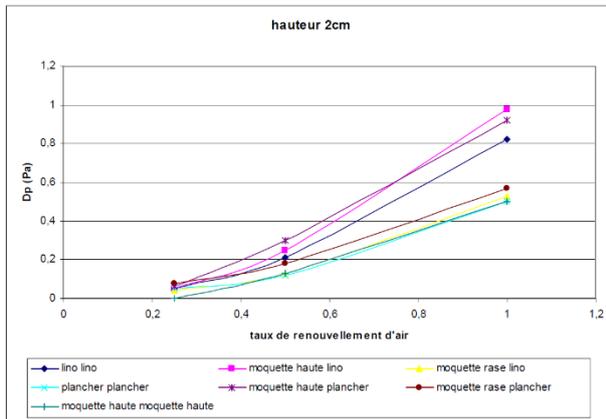
Lorsque le détalonnage est minimal (0 cm), les pertes de charge des différentes combinaisons sont assez proches, tout comme lorsque le détalonnage est maximal (2cm).

Pour un taux de renouvellement d'air de 0,5 volume / heure, correspondant au débit réglementaire, les différentes configurations testées montrent une modification significative de la circulation de l'air autour de 0.8 cm de détalonnage.

Quel que soit les débits, la configuration moquette haute lino présente des  $\Delta p$  plus élevés et donc une perte de charge plus importante.

On constate également que plus on augmente le taux de renouvellement d'air plus  $\Delta p$  augmente avec des hauteurs de détalonnage faibles.





Le classement des pertes de charge pour les différentes combinaisons de revêtements ne varie pas pour des hauteurs de détalonnage données quel que soit le taux de renouvellement d'air. Cette constatation n'est plus tout à fait valable si l'on regarde l'évolution des pertes de charge à taux de renouvellement d'air constant, mais à hauteur de détalonnage variable, où on observe des courbes de pertes de charge qui se croisent en fonction des hauteurs de détalonnage.

On remarque que, à hauteur fixée,  $\Delta p$  des revêtements contrastés (exemple moquette haute/lino ou moquette haute/plancher) augmente plus fortement avec le débit d'air.

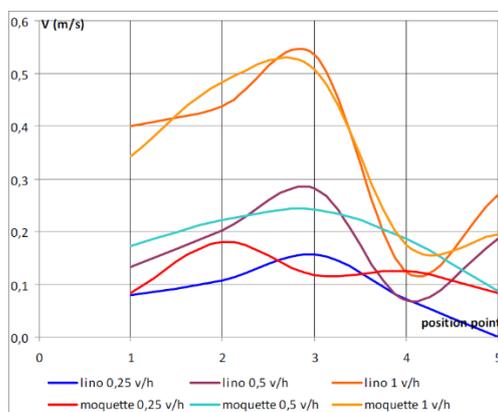
En effet, pour une hauteur de détalonnage de 2 cm la perte de charge la plus faible est pour une combinaison « moquette haute / moquette haute » qui pourtant est la plus forte pour les autres hauteurs. La perte de charge de la combinaison « lino / lino » est assez élevée. Ces résultats semblent montrer que pour certaines combinaisons et pour une hauteur de détalonnage significative, les écoulements d'air sous la porte sont suffisamment différents pour qu'il modifie le classement des pertes de charge. Il faut cependant noter que les pertes de charges restent très faibles.

**Certaines configurations sont donc moins favorables à la bonne circulation de l'air que d'autres : les revêtements épais** (configurations moquette haute d'un côté ou de l'autre de la porte) **ou hétérogènes**, contrairement aux revêtements durs et homogènes (configurations parquet / parquet ou lino/lino par exemple).

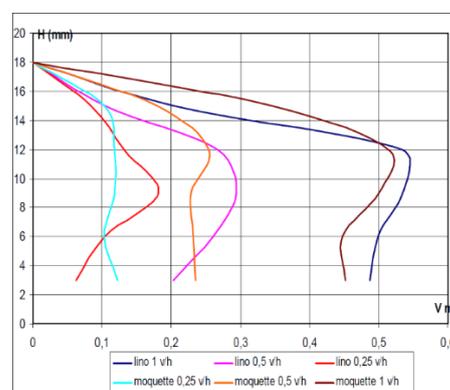
**b. Vitesse**

Il faut noter la grande difficulté à mesurer les vitesses qui sont la plupart du temps en dessous de 1 m/s.

On ne distingue pas de différence importante entre les deux revêtements testés, que ce soit au niveau de la barre de seuil, ou pour les points de mesure de part et d'autre de la porte, d'autant que pour ces derniers, les vitesses sont très faibles et donc difficilement mesurables.



Vitesse au sol



Vitesse sous la porte

## 1.5. Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que la hauteur de détalonnage requise dans le DTU 68-3, d'au minimum 1 cm, correspond bien à une réalité : en deçà de 1 cm, l'espace sous la porte est insuffisant pour permettre une bonne circulation de l'air entre les pièces. Cela favorise la stagnation des polluants et dégrade donc la qualité de l'air intérieur des logements.

Changer un revêtement de sol influe sur le détalonnage de porte et peut avoir des conséquences importantes sur la qualité de l'air intérieur. L'étude menée avec le Laboratoire Aérodynamique Eiffel montre l'importance de cet espace laissé sous les portes intérieures des logements.

## **PARTIE 5 :** **QUELS SONT LES EFFETS DE L'ENCRASSEMENT D'UN SYSTEME DE VENTILATION MECANIQUE ?**

**Objectif :** Observer l'impact de l'encrassement sur la ventilation pour en dégager des recommandations concernant l'entretien de la VMC.

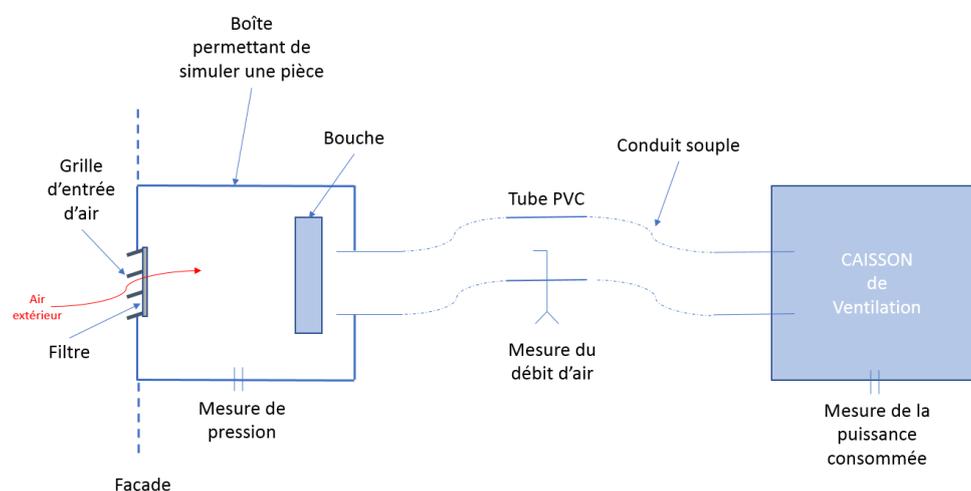
QUALITEL a sollicité le Laboratoire Aérodynamique Eiffel pour réaliser une étude permettant d'analyser l'encrassement de filtres situés dans les entrées d'air de ventilation mécanique contrôlée (VMC) et l'impact de cet encrassement sur la ventilation d'une pièce, et donc sur la qualité de l'air intérieur. D'une durée d'un an, cette étude a consisté à mesurer, pour 6 bouches d'aspiration équipées de filtres, l'évolution des débits d'aspiration, des différences de pression et la puissance électrique consommée par le moteur de la VMC.

### **1. Présentation de l'étude**

Cette étude n'a pas utilisé la maquette (grandeur réelle) mais un banc d'essais constitués de deux caissons de ventilation mécanique contrôlée (VMC) installés sur l'un des murs du laboratoire donnant sur l'extérieur, pour simuler une pièce d'un logement connectée à l'extérieur. Les essais ont été réalisés entre décembre 2016 et décembre 2017.

#### **1.1. Caractéristiques**

- 6 entrées d'air extérieur avec filtre acoustique d'efficacité G3 (qui filtre les grosses particules selon la norme EN779, efficacité de filtration la plus faible), installées sur une fenêtre du bâtiment, d'une surface d'entrée de 35 cm x 2 cm
- 6 boîtes « de tranquillisation » permettant de simuler une pièce, de dimension 30 cm \* 35 cm \* 19 cm pour les boîtes à 15 m<sup>3</sup>/h et 30 m<sup>3</sup>/h, et 30 cm \* 35 cm \* 24,5 cm pour celles à 45 m<sup>3</sup>/h
- 3 raccordements (bouches d'air fournies avec les caissons de ventilation) avec différents débits d'aspiration testés correspondant à différentes typologies et tailles de pièces :
  - 15 m<sup>3</sup>/h (WC)
  - 30 m<sup>3</sup>/h (salle de bain)
  - 45 m<sup>3</sup>/h (cuisine)
- 2 caissons de ventilation mécanique contrôlée identiques



caisson de ventilation 1	Boite 1 (sanitaire)
caisson de ventilation 1	Boite 2 (sanitaire)
caisson de ventilation 1	Boite 5 (cuisine)
caisson de ventilation 2	Boite 3 (sanitaire)
caisson de ventilation 2	Boite 4 (sanitaire)
caisson de ventilation 2	Boite 6 (cuisine)

## 1.2. Méthodologie

- Durée : 1 an, décembre 2016 - décembre 2017
- Plusieurs mesures ont été effectuées chaque mois :
  - Conditions météorologiques : températures, hygrométrie, pression atmosphérique
  - Vitesse et débits d'aspiration de chaque caisson de VMC
  - Pression : la différence de pression entre chaque boîte de tranquillisation et la pression atmosphérique ;
  - Consommation électrique : la puissance du moteur de chacun des 2 caissons de ventilation VMC.

Les mesures ont été effectuées avec un micro-manomètre (type Furness FC014) pour mesurer les pressions, un voltmètre / ampèremètre pour calculer la puissance consommée de chaque caisson de ventilation et 2 centrales météo installées à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment.

Des filtres d'entrées d'air raccordés au caisson de ventilation n°2 ont été changés à 2 reprises :

- Après 5 semaines de fonctionnement, 2 des entrées d'air s'étaient bouchées, suffisamment pour constater une chute très importante des débits dans certaines boîtes d'aspirations. Probablement la conséquence d'une période de plusieurs jours de pic de pollution.
- Après 5 mois de fonctionnement, les 3 filtres d'entrées d'air reliés au caisson de ventilation n°2 ont été changés.

### **Photographies des filtres 4 et 6 bouchés après 5 semaines de fonctionnement :**



Boite 4 - Filtre aval



Boite 6 - Filtre aval



Boite 4 - Filtre amont



Boite 6 - Filtre amont

### **Photographies des filtres 4 et 6 bouchés après 5 mois de fonctionnement :**



Boite 4 - Filtre amont



Boite 6 - Filtre amont



Boite 4 - Filtre aval



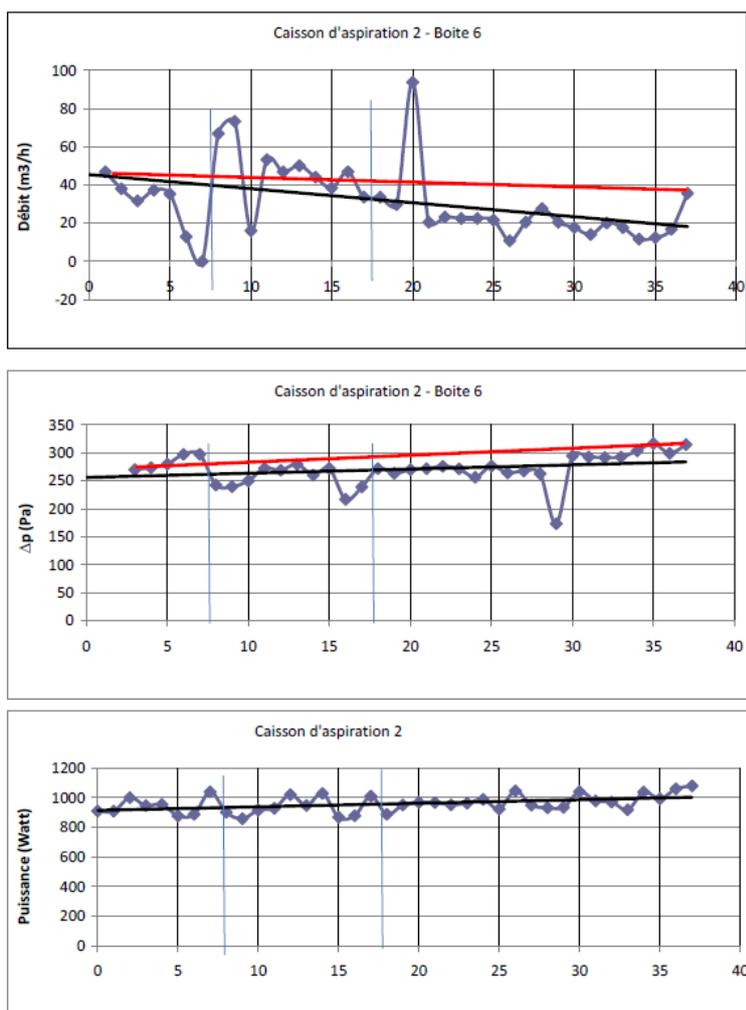
Boite 6 - Filtre aval

Des mesures complémentaires ont été effectuées après un an d'utilisation pour mesurer les débits d'aspiration et les différences de pression sans filtre, puis en installant un filtre neuf sur le système.

### 1.3. Résultats

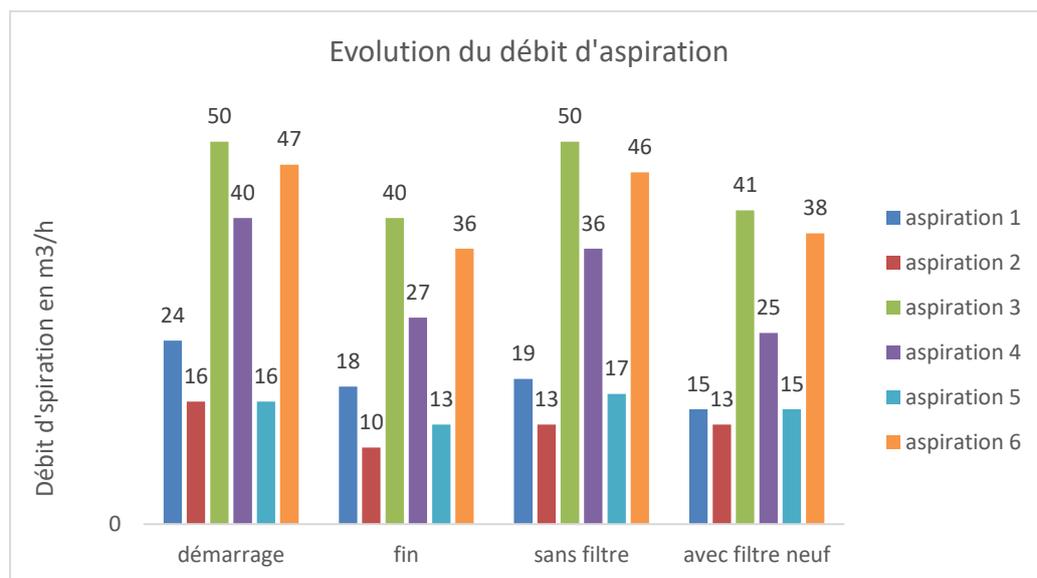
**Exemple de courbe de résultats en fonction du temps (en semaine) obtenus pour la boîte n°6 :**

Le trait vertical en bleu sur les graphiques marque un changement de filtre. La droite en noir représente la courbe de tendance de l'ensemble des points et celle en rouge relie la première mesure à la dernière.



On observe donc une tendance à la baisse des débits de ventilation au cours du temps. Les pics sont liés aux changements des filtres. A contrario, la perte de charge et la puissance augmentent au cours du temps.

**a. Débits**



Dans le cas du caisson n°2 (aspirations 3, 4 et 6), où les filtres ont été changés, que les filtres soient neufs ou usagés, les débits de ventilation ne changent pas et sont inférieurs à ceux mesurés au début des essais. Ainsi, les débits d'aspiration ne dépendent pas du filtre, qu'il soit encrassé ou pas.

Quant aux mesures effectuées dans une configuration sans filtre, les résultats montrent en moyenne un débit supérieur aux mesures des filtres usagés ou neufs, mais cela ne permet pas d'atteindre le débit initial avec filtre.

Ainsi, les mesures effectuées montrent que pour les deux caissons les débits d'aspiration d'air diminuent entre le début et la fin des essais. Les essais sans filtre ou avec nouveau filtre neuf ne permettent pas dans la plupart des cas de retrouver le débit initial avec filtre.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des débits mesurés dans chaque circuit de ventilation en début et en fin de campagne mais aussi les valeurs moyennes sur la durée totale de l'étude et les valeurs théoriques déclarées par le fabricant.

	b1 (m³/h)	b2 (m³/h)	b5 (m³/h)	b3 (m³/h)	b4 (m³/h)	b6 (m³/h)
début	24	16	50	40	16	47
fin	15	13	41	25	15	38
moyenne	20	13	39	28	14	32
théorique	30	15	45	30	15	45

Débit (m3/h)	Caisson 1			Caisson 2		
	Théorique	15	30	45	15	30
Début de l'étude	16	24	50	16	40	47
Fin de l'étude	13	15	41	15	25	38
Moyenne	13	20	39	14	28	32

Le débit d'air baisse régulièrement dans les circuits du système de ventilation, de – 20 % à – 37 %.

Dans l'ensemble des mesures effectuées, on constate des débits moyens et finaux inférieurs aux débits initiaux et théoriques. Les débits initiaux sont en général supérieurs aux débits théoriques.

## b. Différences de pression

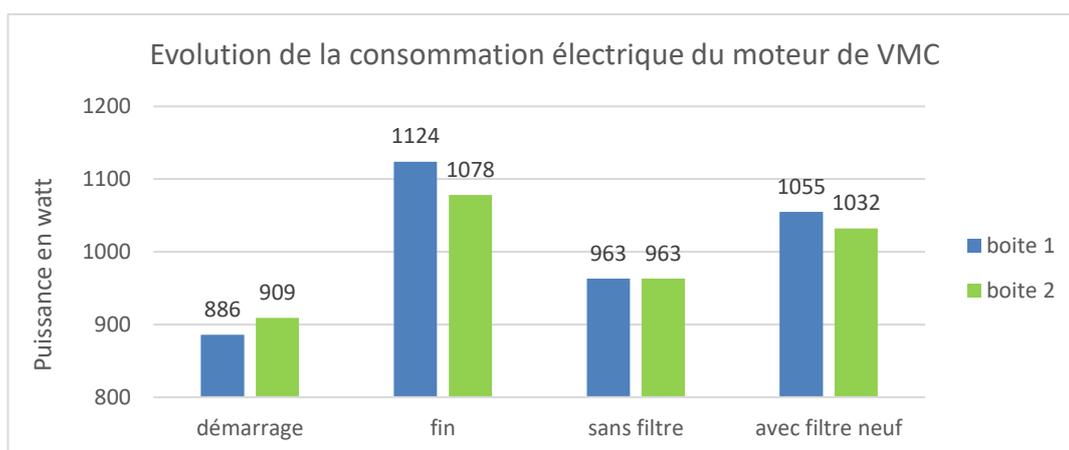
### Résultats des mesures de pression dans les boîtes de tranquillisation :

	P (pa) début	P (pa) fin
Boite 1	200	260
Boite 2	30	90
Boite 3	180	280
Boite 4	40	90
Boite 5	240	290
Boite 6	270	320

On observe une hausse des pressions pour les 2 caissons même quand les filtres ont été changés.

Les mesures ne montrent pas de différences de pression significatives entre filtres neufs ou usagés. Les vitesses mesurées étant faibles, il est difficile d'observer des variations de pression, ce n'est donc pas représentatif d'un phénomène d'encrassement. Sur ce dernier point il faut préciser que la mesure est effectuée entre les boîtes et le hall et que l'on mesure donc la perte de charge du circuit aval, de la boîte de tranquillisation à la sortie des caissons de ventilation et que cela ne caractérise donc pas le filtre.

## c. Puissance du moteur de la VMC



Les mesures effectuées en fin de campagne montrent que la puissance consommée avec un filtre usagé mais aussi après un an d'utilisation en configuration sans filtre ou avec un filtre neuf (entre 963 et 1124 watts) est supérieure à la puissance consommée au début des tests (886 et 909 watts). Les filtres font plus consommer. Ces résultats indiquent que la « perte de charge » ou perte de performance de l'ensemble du circuit a augmenté durant l'année d'essais, et peuvent signaler un encrassement global des circuits et des aubes sur la roue du ventilateur jouant sur la puissance des moteurs du caisson.

Dans le cas du caisson n°2, le remplacement à deux reprises par des filtres neufs a conduit à une diminution de la puissance consommée sur le moteur (- 12,5 % en moyenne). Même si cela ne permet pas d'atteindre la performance du début des tests, changer le filtre permet de réduire la puissance consommée par la VMC.

Les moteurs des caissons consomment de plus en plus au fur et à mesure du temps, + 19 % et + 27 %.

On peut en effet s'interroger sur les différences de comportement entre les 2 caissons, qui sont difficiles à expliquer. Un positionnement différent sur la façade pourrait en être une cause.

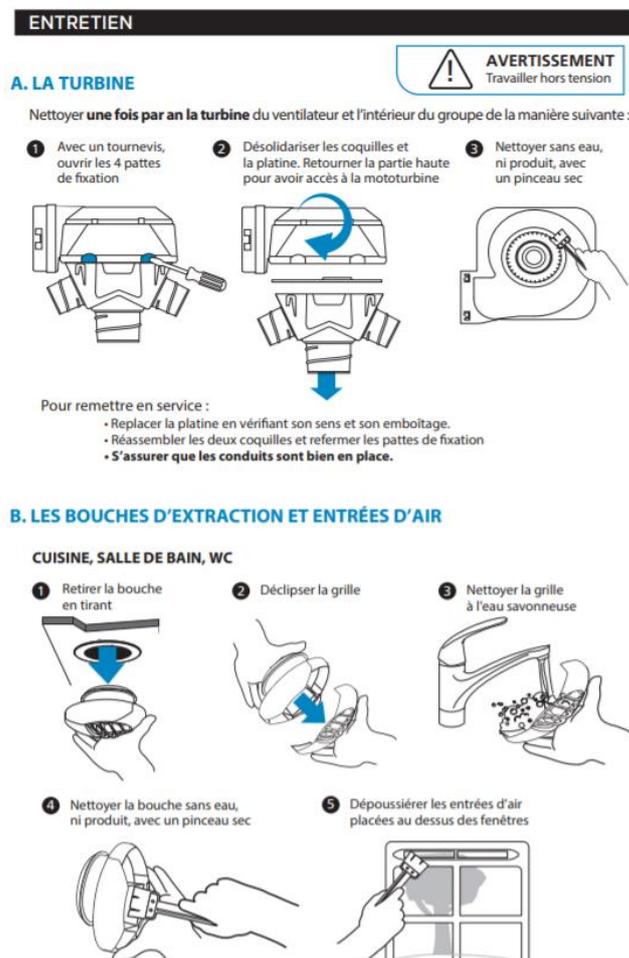
## 1.4. Conclusion

Les différentes mesures effectuées dans le cadre de cette étude montrent un encrassement rapide des filtres installés dans les entrées d'air et soulignent l'impact négatif de cet encrassement à la fois sur le débit d'air et sur les consommations électriques de la VMC, et donc sur la performance de la ventilation.

Une ventilation efficace repose sur une maintenance et un entretien régulier du système mis en œuvre dans un logement. Dans ce cadre, il est primordial d'informer sur la bonne utilisation des systèmes de ventilation en expliquant les gestes permettant de limiter cette perte de performance.

La norme NF DTU 68.3, qui s'applique aux installations neuves de ventilation mécanique dans les bâtiments résidentiels neufs et existants, rassemble en un ouvrage unique les éléments permettant : la conception, le dimensionnement, la mise en œuvre, la mise en service, et la maintenance d'une installation de ventilation mécanique.

Les fabricants mettent en effet à disposition les procédures d'entretien de leurs équipements de ventilation dans les notices techniques de ces derniers comme dans l'exemple ci-après :



L'entretien du système de ventilation et la sensibilisation de tous concernant le nettoyage et le changement des différents composants sont essentiels pour assurer une ventilation performante sur la durée et donc un bon renouvellement de l'air dans les logements.

## 2. Suivi du fonctionnement des VMC simple flux hygroréglables

L'étude a consisté à suivre et enregistrer pendant 15 semaines les débits d'aspiration, les pressions entre bouches d'air dans la pièce et dans la fenêtre et la puissance électrique consommée d'une ventilation mécanique simple flux hygro B.

### 2.1. Caractéristiques

- 3 entrées d'air extérieur avec filtre acoustique d'efficacité G3 (filtre grossier), installées sur une fenêtre du bâtiment, d'une surface d'entrée de 35 cm x 2 cm.
- 3 boîtes « de tranquillisation » permettant de simuler une pièce, de dimension 30 cm \* 35 cm \* 19 cm pour les boîtes à 15 m<sup>3</sup>/h et 30 m<sup>3</sup>/h, et 30 cm \* 35 cm \* 24,5 cm pour celles à 45 m<sup>3</sup>/h.
- 3 raccordements (bouches d'air fournies avec les caissons de ventilation).
- 1 caisson de ventilation mécanique contrôlée simple flux hygro B avec 3 aspirations, 2 de diamètre 80 mm, et 1 de diamètre 125 mm.

### 2.2. Méthodologie

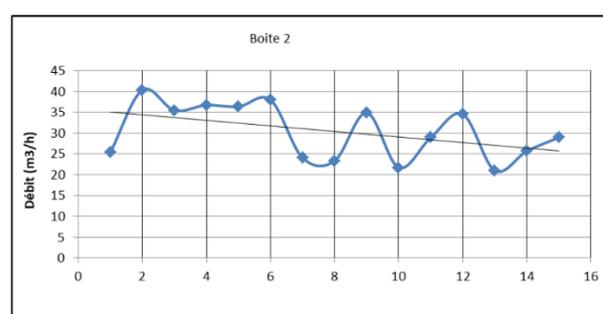
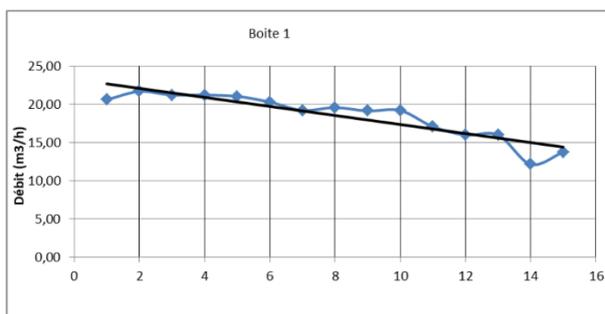
- Durée : 15 semaines, entre janvier et mai 2019.
- Plusieurs mesures ont été effectuées chaque mois :
  - Conditions météorologiques : températures, hygrométrie, pression atmosphérique
  - La vitesse pour en déduire les débits d'aspiration du caisson de VMC
  - Pression statique : la différence de pression entre chaque boîte de tranquillisation et la pression dans le hall;
  - Pression atmosphérique : la différence de pression atmosphérique extérieure et la pression dans le hall, puis entre chaque boîte de tranquillisation et la pression atmosphérique extérieure,
  - Consommation électrique : les caractéristiques électriques du caisson de ventilation VMC.

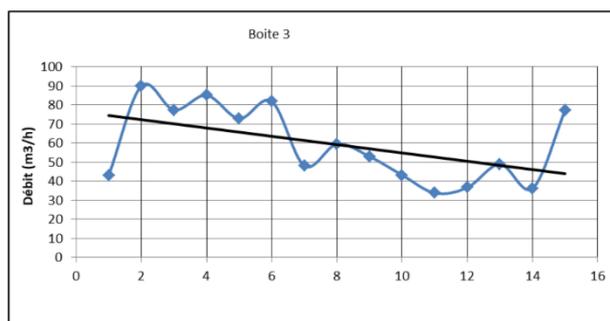
Les mesures ont été effectuées avec un micro-manomètre (type Furness FC014) pour mesurer les pressions, un voltmètre / ampèremètre pour calculer la puissance consommée du caisson de ventilation et 2 centrales météo installées à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment.

### 2.3. Résultats

#### a. Débits

**Débits obtenus au cours du temps (en semaine) pour un caisson de VMC :**





	caisson 1		
	Boite 1 (m <sup>3</sup> /h)	Boite 2 (m <sup>3</sup> /h)	Boite 3 (m <sup>3</sup> /h)
début	21	25	43
fin	14	29	77
Ecart en %	-7	+4	+34
moyenne	19	30	59

Les courbes de tendances (en noir) montrent l'évolution des débits au cours des 15 semaines :

- pour la boîte 1 (φ80 mm) on passe de 22,7 à 14,4 m<sup>3</sup>/h, (réduction de -8,3 m<sup>3</sup>/h, -37% de la valeur initiale) ;
- pour la boîte 2 (φ80 mm) on passe de 35 à 25,6 m<sup>3</sup>/h, (réduction de -9,4 m<sup>3</sup>/h, -27% de la valeur initiale) ;
- pour la boîte 3 (φ125 mm) on passe de 74,3 à 43,9 m<sup>3</sup>/h, (réduction de -30 m<sup>3</sup>/h, -41% de la valeur initiale).

On a pu remarquer d'autre part que les pressions dans chaque boîte restaient globalement constantes durant ces 15 semaines.

Sur ces quelques mois d'essais on peut observer que le fonctionnement du moteur de la VMC reste stable et sa puissance augmente peu : de 0,4 W (soit 1,75%).

Enfin, concernant l'évolution des débits en fonction de l'humidité, le taux d'humidité baisse sur la période d'essais ce qui semble normal compte tenu que les essais ont débutés en janvier pour se terminer en mai avec un printemps plutôt sec. On constate dans les 3 boîtes une diminution simultanée du débit et du taux d'humidité, sûrement lié au fonctionnement de la bouche hygroréglable. En effet, ce type de ventilation fonctionne sur très faible débit en l'absence d'occupants.

### 3. Influence de l'encrassement d'une VMC sur la performance acoustique des entrées d'air

À la suite des études sur l'encrassement de systèmes de ventilation qui ont été menées avec le laboratoire Eiffel, QUALITEL a sollicité le CSTB pour réaliser des essais acoustiques de recherche sur des entrées d'air et des bouches d'extraction.

Les mesures acoustiques portent sur des équipements neufs et des équipements encrassés naturellement après plusieurs mois d'usage. L'objectif est de quantifier l'évolution des performances acoustiques de ces équipements en fonction de leur encrassement.

Cette étude a consisté à réaliser des essais acoustiques pour étudier l'influence de l'encrassement d'une VMC sur la performance acoustique des entrées d'air.

Une entrée d'air est caractérisée par son isolement normalisé  $D_{n,e,w+Ctr}$ , qui indique la manière dont elle réduit les bruits en provenance de l'extérieur. Pour information, une grille simple d'entrée d'air (non autoréglable ou hygroréglable) possède un isolement de 33 dB.

Les essais ont porté sur la mesure en laboratoire au CSTB selon la norme ISO 10140-2 des caractéristiques acoustiques suivantes :

- L'isolement acoustique normalisé,  $D_{n,e}$  sur 10 configurations d'entrées d'air (encrassées et non encrassées, avec et sans filtre)
- La puissance acoustique,  $L_w$  sur 6 configurations de bouches d'extraction

### 3.1. Caractéristiques

- 2 caissons identiques de ventilation mécanique contrôlée.
- 3 raccordements sur chaque caisson avec différents débits d'aspiration testés correspondant à différentes typologies et tailles de pièces :
  - 15 m<sup>3</sup>/h (salle de bain)
  - 30 m<sup>3</sup>/h (chambre, petit séjour, cuisine, grande salle de bain)
  - 45 m<sup>3</sup>/h (séjour, grande cuisine)
- 6 entrées d'air extérieur avec filtre d'efficacité G3 (filtre grossier).

### 3.2. Méthodologie

Le laboratoire Eiffel a livré la VMC autoréglable encrassée et une VMC neuve :

#### Matériel encrassé :

- Toutes les entrées d'air.
- Toutes les bouches d'extraction.
- Un groupe VMC avec ses conduits.

#### Matériel neuf acheté à l'identique :

- Une entrée d'air neuve.
- Deux bouches d'extraction (1 cuisine, 1 salle de bain).
- Un groupe neuf avec ses conduits.

ATLANTIC a livré la VMC Hygroréglable type B neuve.

#### Matériel neuf :

- 3 entrées d'air :
  - 1 neuve EH 5/45 à 37 dB (module intérieur).
  - 1 neuve EH 5/45 + RA à 39 dB (rallonge + module intérieur).
  - 1 neuve EH 5/45 + RA + C à 42 dB (auvent extérieur + rallonge + module intérieur).
- Deux bouches d'extraction (1 cuisine, 1 salle de bain).
- Un groupe neuf avec ses conduits.

#### Matériel encrassé si possible :

- 1 entrée d'air encrassée EH 5/45 à 37 dB (module intérieur).

#### Essais acoustiques :

10 mesures de  $D_{n,e}$  sur les entrées d'air suivantes :

- Autoréglables :
  - 1 neuve
  - 5 encrassées à différents stades d'encrassement
- Hygroréglables :
  - 1 neuve EH 5/45 à 37 dB (module intérieur)

- 1 neuve EH 5/45 + RA à 39 dB (rallonge + module intérieur)
- 1 neuve EH 5/45 + RA + C à 42 dB (auvent extérieur + rallonge + module intérieur)
- 1 encrassée EH 5/45 à 37 dB (module intérieur)

6 mesures de Lw sur les ensembles (bouches extractions + conduits + groupe) suivants :

- Autoréglables :
  - 1 cuisine neuve
  - 1 sdb neuve
  - 1 cuisine encrassée
  - 1 sdb encrassée
- Hygroréglables :
  - 1 cuisine neuve
  - 1 sdb neuve

### 3.3. Mesures

**Une entrée d'air encrassée, sans l'insertion d'un filtre :**



**Le filtre n°5 a été inséré dans l'entrée d'air pour les essais acoustiques :**



**Une entrée d'air neuve, avec l'insertion d'un filtre dans le module intérieur :**



**Le module extérieur de l'entrée d'air encrassée installé du côté de la salle d'émission des bruits :**



**Le module intérieur de l'entrée d'air encrassée installé du côté de la salle de réception des bruits :**



### 3.4. Résultats

Les résultats obtenus sont en moyenne les suivants :

Isolement Dn,e,w+Ctr	Sans filtre	Avec filtre
Neuve	37 dB	37 dB
Encrassée	38 dB	38 dB

Les résultats obtenus montrent d'abord que l'insertion d'un filtre dans l'entrée d'air n'a aucune influence sur l'isolement acoustique, qu'elle soit neuve ou encrassée. Cela s'explique par le fait que le filtre est poreux et n'apporte aucune résistance à l'air, même lorsqu'il est encrassé.

L'encrassement des entrées d'air augmente globalement l'isolement d'un seul décibel. Cet écart est relativement négligeable sur le plan métrologique mais aussi du point de vue perceptif.

Compte tenu du fait que la présence du filtre n'a pas d'influence, il semble que ce soit plutôt l'encrassement du module extérieur qui soit responsable de cette légère augmentation.

Compte tenu des faibles écarts mesurés sur l'isolement acoustique des entrées d'air en fonction de l'encrassement, cette expérience permet de conclure que **les occupants ne percevront pas plus de bruit lorsqu'ils nettoient leur entrée d'air.**

## CONCLUSION GENERALE

La ventilation d'un logement repose sur un principe de circulation de l'air des pièces où de l'air « neuf » entre, vers des pièces où l'air « vicié » est extrait. Les déplacements de l'air dans le logement sont donc liés au système de ventilation installé, à l'emplacement des entrées d'air et des bouches d'extraction, mais aussi à la taille du logement, son occupation, son aménagement, ...L'Association QUALITEL a fait appel au Laboratoire Aérodynamique Eiffel pour étudier la circulation de l'air dans une pièce et ainsi déterminer où positionner les entrées et sorties d'air, le mobilier, l'équipement de chauffage et en faisant varier également le taux de renouvellement de l'air. Différents tests ont été réalisés dans une pièce témoin à travers des études physiques, complétées par des simulations numériques.

L'étude de faisabilité a permis de déterminer que les techniques de visualisation à la fumée et la mesure de la température permettaient d'analyser la circulation de l'air dans la pièce. Ainsi, on a pu constater que l'orientation de l'entrée d'air conditionne le sens de la circulation de l'air à l'intérieur de la pièce. Lorsqu'on ajoute un radiateur, le chauffage devient le moteur des circuits aérauliques dans la pièce, quelle que soit l'orientation de l'entrée d'air. On observe un gradient de température dans la pièce avec ou sans isolation, les températures relevées en bas de la pièce étant inférieures de 10% à la valeur moyenne de la pièce et en haut supérieur d'environ 10%. Les températures des parois restent inférieures à la valeur moyenne de la pièce.

L'étude paramétrique a permis de tester l'influence du positionnement de l'entrée d'air et de la sortie d'air ainsi que du dispositif de chauffage. Ce positionnement variable des équipements modifie les valeurs moyennes de température et révèlent une réelle influence sur la diffusion de l'air. Une configuration inadaptée, comme la proximité des entrées et sorties d'air, peut faire apparaître des zones de stagnation. Il est donc important de privilégier l'éloignement des bouches de soufflage et d'extraction pour favoriser la diffusion de l'air. L'entrée d'air et le radiateur doivent être proches pour limiter la sensation de froid et ainsi éviter que l'entrée d'air ne soit bouchée par l'occupant.

Cette étude a aussi permis à Aérodynamique Eiffel de mettre au point un modèle numérique pour étudier la ventilation hygiénique à l'intérieur d'une pièce. Les circuits aérauliques internes ont été clairement identifiés et sont comparables à ce qui a pu être observé lors des visualisations par la fumée (étude paramétrique). L'outil numérique s'est effectivement avéré complémentaire à l'étude physique, permettant de déterminer avec précision les champs de vitesse dans la pièce ainsi que les lignes de courants. Ainsi, les résultats obtenus via la pièce-laboratoire ont été utiles au développement de l'outil et à la validation des résultats obtenus. Ils sont d'ailleurs très proches des résultats physiques : sans chauffage, les zones de moindre ventilation sont situées dans les coins de la pièce, d'autant plus si elles sont éloignées des entrées et sorties d'air. Au plafond les vitesses de l'air sont plus importantes, donc les couches hautes sont mieux ventilées. La position de l'entrée d'air semble beaucoup influencer le système. En présence de chauffage, le moteur principal des écoulements dans la pièce est le radiateur (phénomène confirmé puisque déjà observé lors de l'étude paramétrique précédente). Les vitesses générées par l'échauffement de l'air sont beaucoup plus fortes que celles générées par la ventilation. En dehors des flux convectifs observables près du radiateur, seules les vitesses d'air au niveau de la bouche d'entrée sont quantifiables mais leur orientation est très marquée par la présence du radiateur.

Les études suivantes ont porté sur la diffusion du CO<sub>2</sub> afin de mieux comprendre la circulation de l'air et des polluants dans une pièce en présence d'une personne. La première étude a permis de finaliser la mise au point de l'outil de simulation numérique sur la diffusion du CO<sub>2</sub> en visualisant les écoulements, difficiles à réaliser dans la maquette physique du fait de leurs très faibles vitesses. En présence de CO<sub>2</sub> injecté sans chauffage, une ventilation de type « déplacement inversé » s'effectue dans la pièce avec une stratification du CO<sub>2</sub> au sol. La zone la moins ventilée est située sur la paroi longitudinale la plus éloignée de l'entrée. Et présence de CO<sub>2</sub> à l'intérieur de la pièce avec du chauffage, on observe une ventilation de type « mixte » et la stratification disparaît. Comme déjà démontré dans les études précédentes, le chauffage devient la pompe de brassage de l'air. Le CO<sub>2</sub> est mélangé dans l'air par les mouvements convectifs dû au chauffage. En traversant la pièce, il est chauffé, sa masse volumique

diminue et donc une partie reste au plafond. Ces tendances se confirment avec la maquette physique, on constate que sans chauffage, les zones les moins ventilées sont situées dans les coins de la pièce, les plus éloignées des entrées et sorties d'air. Les taux de CO<sub>2</sub> sont plus élevés près du sol à côté des lieux d'émission. Dans une pièce chauffée, le taux de CO<sub>2</sub> est plus élevé dans les zones situées en hauteur et dans les coins de la pièce. Les taux maximums de CO<sub>2</sub> sont plus faibles dans la configuration avec chauffage, restant en dessous de 1200ppm. En moyenne, avec ou sans chauffage, les concentrations maximales en CO<sub>2</sub> sont atteintes autour de 4/5h (et dépassent les 1000ppm). Les taux se stabilisent à partir de 7/8h, alors que sans chauffage, le temps de stabilisation se situe autour de 5h. Les taux de CO<sub>2</sub> augmentent fortement sans ventilation pour atteindre près de 3000ppm en moins de 3 heures. Cela confirme que l'absence de ventilation dans une pièce est très néfaste pour la qualité de l'air.

La deuxième partie de l'étude a porté sur l'identification de zones de stagnation d'air dans une pièce, en faisant varier les positions des entrées d'air et du radiateur. Dans la configuration représentant un séjour dans un logement ancien, une légère stratification du CO<sub>2</sub> a été constaté : le taux minimum au sol et le maximum au milieu. Les taux de CO<sub>2</sub> sont plus élevés sans chauffage et les plus faibles quand l'entrée d'air et le radiateur sont proches et au centre de la pièce. Les zones proches de la sortie d'air, ont des taux de CO<sub>2</sub> plus élevés et sont donc les moins ventilées. Dans la configuration représentant un séjour avec cuisine ouverte dans un logement récent, les zones les mieux ventilées sont aussi situées près de l'entrée d'air (avec et sans chauffage) et les zones proches de la sortie d'air sont également les moins ventilées, mais en l'absence de chauffage, la zone au centre devient la moins bien ventilée. Ce phénomène de zone morte, au centre, n'apparaît pas quand la pièce est ventilée et non chauffée. Sans chauffage, le CO<sub>2</sub> tombe au sol, avec des concentrations plus élevées. Les taux de CO<sub>2</sub> augmentent avec le chauffage et sont au maximum à mi-hauteur. On constate finalement des concentrations en CO<sub>2</sub> très proches, dans les 2 configurations avec un « faible » débit de 0,5vol/h.

La troisième partie de l'étude s'est intéressée au comportement de l'air en présence de deux personnes, en faisant varier la position du radiateur et des sources de CO<sub>2</sub>. Sans chauffage, la configuration avec le lit placé au centre de la pièce est la plus favorable en termes de concentrations de CO<sub>2</sub> et les zones au centre ou dans le coin haut sont les moins bien ventilées. La zone vers la sortie d'air est bien ventilée. On remarque tout de même que les concentrations en CO<sub>2</sub> ne descendent en dessous de 1000ppm qu'avec un débit de ventilation de 3vol/h dans une pièce de 10m<sup>2</sup> occupée par 2 personnes. Avec chauffage, il semble préférable de placer le lit vers la sortie avec le radiateur proche de l'entrée d'air (zone la mieux ventilée) contrairement au centre ou vers la sortie. On constate que les zones et les configurations les meilleures pour les essais isothermes sont différentes pour ceux non-isothermes.

Enfin la quatrième partie a testé une ventilation mécanique double flux avec les mêmes configurations précédentes. La configuration A est à privilégier par rapport à la B, la concentration maximale est atteinte au centre de la pièce près du sol en présence du chauffage. Par rapport au cas isotherme, la présence du chauffage permet de légèrement améliorer l'homogénéité de la concentration du CO<sub>2</sub> et également de limiter les zones admettant des taux supérieurs à 0,2 %. Dans ce cas, la position P1 est à privilégier par rapport à la position P2. La configuration B n'est pas à privilégier, même si c'est la position P2 dans ce cas qui permet de limiter les concentrations en CO<sub>2</sub>.

Par rapport aux résultats avec la ventilation simple flux, on retrouve les mêmes conclusions sans chauffage où la configuration A est plus favorable et les zones au centre ou dans le coin haut sont les moins bien ventilées. La zone vers la sortie d'air est bien la mieux ventilée. Avec la ventilation double flux et sans chauffage, cela n'est pas significatif mais les concentrations en CO<sub>2</sub> semblent dans l'ensemble moins élevées qu'avec une ventilation simple flux. Ce constat n'est pas valable dans les configurations avec chauffage. En effet, en présence de chauffage, les conclusions sont très différentes puisqu'avec une ventilation simple flux la meilleure configuration est la B avec chauffage et le radiateur en position P2 et les concentrations en CO<sub>2</sub> sont dans l'ensemble moins élevées.

L'étude portant sur le détalonnage des portes montre l'importance de cet espace laissé sous les portes intérieures des logements. La hauteur de détalonnage requise dans le DTU 68-3, d'au minimum 1 cm,

correspond bien à une réalité : en deçà, l'espace sous la porte est insuffisant pour permettre une bonne circulation de l'air entre les pièces. Cela favorise la stagnation des polluants et dégrade donc la qualité de l'air intérieur des logements. Le type de revêtement de sol influe également sur la bonne circulation de l'air, plus ils seront hétérogènes et épais, plus la perte de charge sera élevée.

L'étude portant sur les effets de l'encrassement d'un système de ventilation mécanique a mis en lumière l'encrassement rapide des filtres installés dans les entrées d'air et souligné l'impact négatif de celui-ci à la fois sur le débit d'air et sur les consommations électriques de la VMC, et donc sur la performance de la ventilation. Une ventilation efficace dans le temps repose sur une maintenance et un entretien régulier du système mis en œuvre dans un logement. Dans ce cadre, il est primordial d'informer et se renseigner sur la bonne utilisation des systèmes de ventilation (VMC) en expliquant les gestes permettant de limiter cette perte de performance (information sur le nettoyage généralement présente dans les fiches techniques des produits).

Lors du suivi du fonctionnement d'une VMC simple flux hygroréglable, on a pu remarquer que les pressions dans chaque boîte de tranquillisation restaient globalement constantes, que le fonctionnement du moteur restait également stable et sa puissance augmentait peu durant les 4 mois de test. Cependant concernant l'évolution des débits en fonction de l'humidité, on a pu constater dans les 3 boîtes une diminution simultanée du débit et du taux d'humidité, sûrement lié au fonctionnement de la bouche hygroréglable. En effet, ce type de ventilation fonctionne sur très faible débit en l'absence d'occupants.

Enfin, la dernière étude a consisté à réaliser des essais acoustiques sur des entrées d'air et des bouches d'extraction afin de quantifier l'évolution des performances acoustiques de ces équipements en fonction de leur encrassement. Les résultats obtenus montrent d'abord que l'insertion d'un filtre dans l'entrée d'air n'a aucune influence sur l'isolement acoustique, qu'elle soit neuve ou encrassée. Cela s'explique par le fait que le filtre est poreux et n'apporte aucune résistance à l'air, même lorsqu'il est encrassé. L'encrassement des entrées d'air augmente globalement l'isolement d'un seul décibel. Cet écart est relativement négligeable sur le plan métrologique mais aussi du point de vue perceptif. Compte tenu du fait que la présence du filtre n'a pas d'influence, il semble que ce soit plutôt l'encrassement du module extérieur qui soit responsable de cette légère augmentation. Cette expérience a permis de conclure que les occupants ne percevront pas plus de bruit lorsqu'ils nettoient leur entrée d'air.

## REMERCIEMENTS

L'Association Qualitel remercie vivement le laboratoire Aérodynamique Eiffel pour toutes les études menées au cours de ces cinq années et notamment Benoît BLANCHARD, Directeur du laboratoire et Margherita FERRUCCI, ingénieur des études et des essais. L'association remercie également le groupe Atlantic pour la fourniture du matériel mis à disposition pour les essais d'encrassement et les tests avec une ventilation double flux.