

# Développement d'un modèle multizone et d'une plateforme expérimentale. Stratégies de régulation avancées de la ventilation hygiénique

Olivier Jung<sup>1</sup>, Mohamed El Mankibi, Pierre Michel

<sup>1</sup> LASH. – Laboratoire des Sciences de l'Habitat  
ENTPE : 2, Rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin ,  
[olivier.jung@entpe.fr](mailto:olivier.jung@entpe.fr)

---

## RESUME.

*Cet article présente le travail effectué au sein du Laboratoire des Sciences de l'Habitat dans le cadre du projet de travail Cli'Nat en collaboration avec l'ADEME et les entreprises ALDES, SOMFY et TECHNAL. L'objectif de ce travail est de développer et d'évaluer numériquement et expérimentalement des stratégies de contrôle pour des systèmes de ventilation hybride dans un bâtiment multizone.*

*Un bâtiment test situé sur le campus de l'ENTPE est aménagé en plateforme expérimentale. Elle offre la possibilité de simuler des occupations variables dans l'espace et le temps, et de tester le contrôle de composants de ventilation hybride spécifiques à ce projet. Un modèle numérique sur la base de cette plateforme expérimentale a été développé sous un environnement matlab/simulink. Il a permis après validation le test et l'évaluation rapide de multiples stratégies de contrôle multi-sources et multi-zonales.*

*MOTS-CLÉS : Ventilation hybride, Modélisation, Expérimentation.*

---

## 1. INTRODUCTION

La diminution significative des déperditions au travers des parois des bâtiments au moyen d'isolations thermiques renforcées a aussi mis en exergue l'importance de la ventilation et du renouvellement d'air dans les dépenses énergétiques. En marge de ce phénomène, les préoccupations en termes de qualité des ambiances intérieures, notamment en conditions d'été, ont de même renforcé l'intérêt porté à la ventilation.

L'utilisation de la ventilation hybride, qui mêle ventilation naturelle et mécanique, est associée à un contrôle du renouvellement d'air complexe. La perméabilité intrinsèque des bâtiments, liée aux types de parois et aux aérations, mais aussi la variabilité des flux d'air passant au travers des grandes ouvertures en ventilation naturelle justifient cette complexité. Cette « perméabilité » globale du bâtiment reste cependant nécessaire pour palier à une éventuelle mise en surpression ou en dépression du bâtiment lors de l'utilisation de la ventilation mécanique. Dans le cadre du projet Cli'Nat, les aérations sont variables et contrôlées en fonction des écarts de pression entre intérieur et extérieur. Elles sont réalisées au moyen de profilés aérateurs situés dans les premiers centimètres d'ouverture de fenêtre coulissantes motorisées.

L'étude présentée ici a pour objectif de définir et d'optimiser des stratégies de contrôle utilisant ce dispositif dans le cadre d'un bâtiment multizone. Pour ce faire, une expérimentation a été montée sur le campus de l'ENTPE, et a servi de plateforme de test et de calibration pour un modèle numérique associé.

## 2. DESCRIPTION DE LA PLATEFORME EXPERIMENTALE

La spécificité du dispositif étudié dans le cadre du projet impliquait la création d'une plateforme expérimentale de test. Celle-ci devait être représentative d'un bâtiment multizone, c'est-à-dire présenter plusieurs ouvertures, dans différentes orientations et salles.

### 2.1. LA VILLA

Il s'agit d'une villa de fonction située sur le campus de l'ENTPE. Seule une partie de cette villa a été isolée et exploitée. Elle est composée de quatre chambres desservies par un couloir, auxquelles s'ajoutent deux salles d'eau.

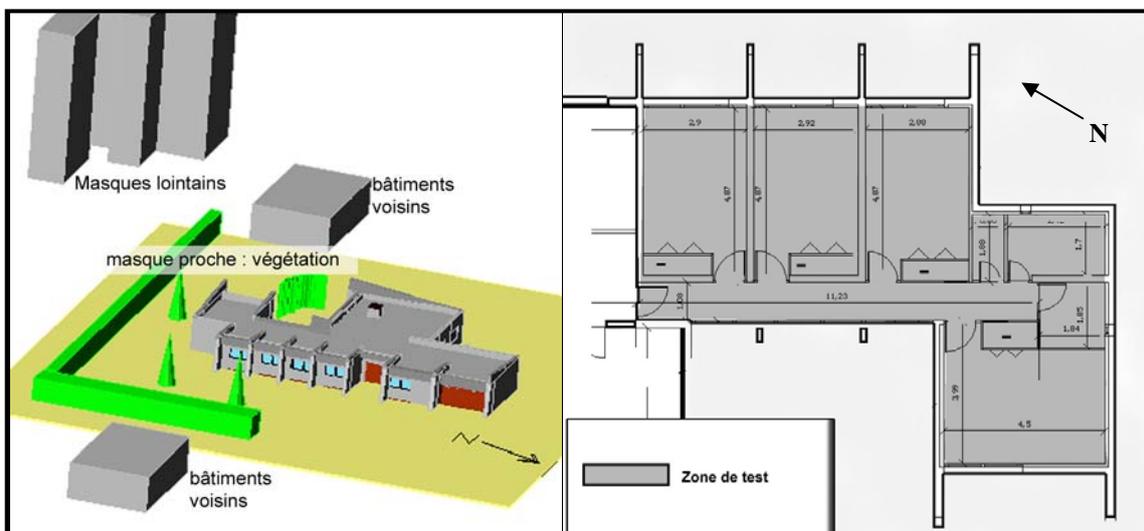


Figure 1 : Aperçu de la villa et de la zone de test

### 2.2. DISPOSITIF DE MESURE

Le confort dans le bâtiment est interprété dans cette étude à partir des conditions thermiques et de la qualité d'air. Chaque zone est munie d'un capteur de température/hygrométrie placé en milieu de zone à une hauteur de 1m50. En comptant les quatre chambres, le couloir, les deux salles d'eau, l'extérieur et les deux salles en limites de la zone de mesure, un total de dix capteurs de températures et hygrométries sont simultanément utilisés.

Concernant la qualité d'air, L'agence internationale de l'énergie a étudié différents indicateurs permettant d'assurer une ventilation asservie à la demande. Parmi eux la concentration en dioxyde de carbone apparaît comme la plus représentative de la pollution émise par les occupants non fumeurs. Cette concentration a l'avantage d'être une grandeur mesurable à des coûts abordables et avec une constante de temps qui s'accorde avec une gestion de la ventilation. De plus, le dioxyde de carbone présente aussi l'avantage de ne pas interagir avec les autres polluants et n'est pas absorbé par les surfaces (Liddament, 1996), ce qui implique que sa concentration n'est pas faussée. Par conséquent, chaque zone potentiellement occupée, le couloir et l'extérieur sont équipés d'un capteur de CO<sub>2</sub>.

Enfin, le dispositif spécifique de cette étude nécessite le suivi des pressions différentielles qui sont donc mesurées de part et d'autre des ouvrants.

### 2.3. SIMULATION D'OCCUPATION

La simulation d'occupation permet d'approcher le dégagement de chaleur sensible et de CO<sub>2</sub> d'occupants réels. Chaque chambre de la villa est dotée du même dispositif qui permet de simuler la présence de 0, 1, 5 ou 10 occupants.

La chaleur sensible dégagée par occupant virtuel est de 125 W (1,2met) et le dégagement de CO<sub>2</sub> correspondant est de 0,3 L.min<sup>-1</sup>.

Le dégagement de chaleur sensible est obtenu au moyen d'un jeu d'ampoules commandé par des relais. Ces jeux d'ampoules permettent donc de délivrer une puissance de 0W (aucun occupant), 125W (un occupant), 625W (cinq occupants), ou 1,25kW (dix occupants).



Figure 2 : Dispositif de simulation d'occupation par dégagement de chaleur

### 2.4. DISPOSITIF DE CONTROLE

La plateforme de test permet le contrôle de trois actionneurs : les stores, les ouvrants coulissants et la ventilation mécanique.

#### 2.4.1. Stores

Il s'agit de stores complets métalliques caractérisés pour le contrôle par une vitesse d'ouverture et de fermeture. Dans le cas d'une régulation thermique faisant appel au contrôle des stores, le contrôleur se réfère au possible ensoleillement de chaque vitrage. Ce potentiel a été au préalable déterminé à partir de photographies fish-eyes superposées au diagramme solaire correspondant.

#### 2.4.2. Ouvrants motorisés

Les ouvrants coulissants ont été motorisés et équipés d'un capteur de pression différentielle et du dispositif de profil aérateur. Chaque zone d'occupation possible possède un de ces ouvrants. Afin d'exploiter le potentiel du profilé, les bouches d'aérations et les baies vitrées ont été calfeutrés avec des films polyane.

#### 2.4.3. Ventilation mécanique

En plus des ouvrants, ces zones sont équipées d'une ventilation mécanique par insufflation variable. Ce type de ventilation est susceptible d'engendrer des surpressions dans le bâtiment. Les ouvrants avec le profil aérateur sont aussi utilisés pour limiter l'écart de pression différentiel entre intérieur et extérieur dû au renouvellement d'air mécanique.

## 3. MODELISATION NUMERIQUE

Afin de permettre le développement et le test rapide de stratégies de contrôles permettant d'optimiser l'usage du concept, un modèle numérique dénommé Multicell a été élaboré sous environnement MatLab/Simulink. Il est inspiré du modèle Hybcell (El Mankibi, 2003) et reprend ses principales hypothèses. Il présente l'avantage de descendre à un pas de temps de l'ordre de la minute, ce qui correspond au pas de contrôle pour les stratégies de régulation. Ce modèle n'a cependant pas vocation à être généralisé à d'autres bâtiments que la villa pour laquelle il a été développé et validé.

### 3.1. STRUCTURE DU MODELE

Le modèle numérique s'organise alors selon le schéma fonctionnel de la figure 3. La combinaison du modèle d'enveloppe et aéraulique permet d'effectuer un bilan du volume d'air et de calculer la température intérieure, tandis que le modèle de polluants permet d'estimer la concentration en CO<sub>2</sub>.

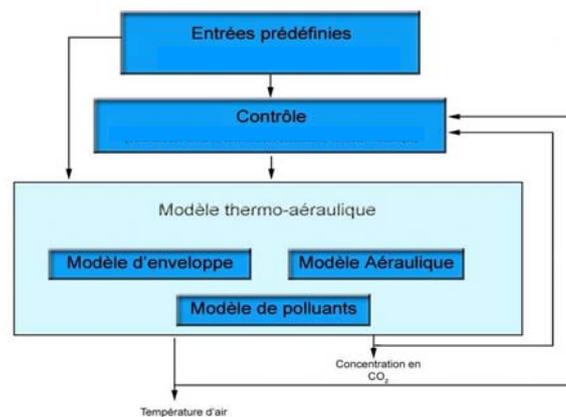


Figure 3 : Structure du modèle Multicell

#### 3.1.1. Bilan des volumes d'air

L'objectif du modèle présenté est d'évaluer la concentration en CO<sub>2</sub> et la température interne moyenne de chaque zone. En ce qui concerne la température interne, le bilan des volumes d'air intérieur [1] se base sur un modèle simple à un nœud de température (ELMANKIBI,2003).

Le bilan sur les volumes d'air intérieur traduit l'ensemble des échanges thermiques entre ce volume et ses conditions aux limites. Le calcul prend en compte les apports ou les pertes dus au renouvellement d'air, les échanges par convection au niveau des parois environnantes, les gains internes convectifs liés à une potentielle occupation.

$$\rho \cdot V \cdot C \cdot \left( \frac{dT_{int}}{dt} \right)_i = \sum_j q_j \cdot C \cdot (T_j - T_{int}) + \sum_i h_i \cdot S_i \cdot (T_{s_i} - T_{int}) + \Phi_{gains} \quad [1]$$

Où  $q_j$  est le débit d'air entrant venant de la zone  $j$  [kg/s],  $C$  la chaleur massique de l'air et  $h_i$  le coefficient d'échange convectif.

#### 3.1.2. Modèle aéraulique

Le modèle aéraulique détermine les débits d'air entre chaque zone. Ces débits calculés permettent de déterminer les déperditions ou gains énergétiques et les échanges de polluants entre les différentes pièces d'une habitation.

La méthode adoptée est celle de nombreux modèles thermo-aéraulique tels que Hybcell (ELMANKIBI,2003), Aiolos (ALLARD,1998), Pascool (LIMAN,1992) ou Comis(FEUSTEL,1990, LIMAN,1992). Elle utilise les équations de Bernoulli pour calculer les vitesses d'air au travers des ouvertures, les débits et les effets du vent.

L'effet vent est retranscrit par l'utilisation de coefficient de pression  $C_p$ . Dans ce modèle ils proviennent de l'annexe F de l'AIVC Guide 5 Ventilation Modelling Data Guide (ORME,2002). L'écart de pression généré par le vent sur une façade est donné par l'équation [2].

$$P_{w_i}(z) = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho_i \cdot V_z^2 \quad [2]$$

Le tirage thermique est modélisé par une variation de pression hydrostatique [3]

$$\Delta P_{i,j}(z) = \Delta P_{w_{i,j}} + \Delta P_{0_{i,j}} - \Delta \rho_{i,j} \cdot g \cdot z \quad [3]$$

Les débits d'air au travers des grandes ouvertures (portes ouvertes, fenêtres) sont exprimés dans les équations [4] où  $Z_n$  est le plan neutre.

$$Q_{\text{inf}} = \frac{\Delta P(z)}{|\Delta P(z)|} C_d \cdot W \int_{z_{\text{inf}}}^{z_n} \left( \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta P(z)|}{\rho_{\text{moy}}}} dz \right) \text{ et } Q_{\text{sup}} = \frac{\Delta P(z)}{|\Delta P(z)|} C_d \cdot W \int_{z_n}^{z_{\text{sup}}} \left( \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta P(z)|}{\rho_{\text{moy}}}} dz \right) \quad [4]$$

Le code en pression en lui-même repose sur le principe de conservation de la masse dans chaque zone et la résolution de ce système d'équations non linéaires par la méthode itérative de Newton-Raphson (E. Dascalaki, 1992, LIMAN, 1992).

### 3.1.3. Modèle d'enveloppe

Le modèle d'enveloppe détermine les températures de surfaces. Dans les littératures on retrouve principalement deux types dynamiques de modèle pour résoudre les problèmes de transferts de chaleur au travers d'une paroi. Les modèles d'état et les modèles de transfert. A l'instar du modèle Hybcell (ELMANKIBI, 2003), c'est un modèle d'état qui est utilisé; la méthode des différences finies explicite.

Le rayonnement solaire traversant les vitrages est appliqué à la surface du sol. Les facteurs de formes  $F_{ij}$  pour les rayonnements grandes longueur d'ondes sont estimés à partir des surfaces [6].

$$F_{i,j} = \frac{A_j}{\sum_{k=1}^N (A_k)} \quad [6]$$

Les coefficients d'échanges convectifs  $h$  sont calculés selon les recommandations de la RT2005.

Faces	flux de chaleur	h [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
FACES intérieures	Ascendant	5
	Horizontal	2,5
	Descendant	0,7
FACES extérieures		4+4V

V : vitesse de vent en m/s

Tableau 1 : coefficient d'échanges convectifs selon la RT2005

### 3.1.4. Modèle de polluants

Le modèle de polluant adopté est similaire en tout point au modèle Hybcell. Le calcul des concentrations dans chaque zone est effectué selon l'équation [7].

$$\frac{d(C_{CO_2})_i}{dt} = \sum_j \left[ Q_{ji} \left( (C_{CO_2})_j^t - (C_{CO_2})_i^t \right) \right] + N_{\text{occupant}} \times Q_{\text{pol}} \quad [7]$$

## 3.2. VALIDATION DU MODELE

Le modèle a été confronté dans un premier temps à plusieurs sessions de mesures sur la plateforme expérimentale, allant d'une semaine à quinze jours, en période hivernale, puis en mars et avril 2008. Des exemples de résultats sont présentés sur la figure 4. La phase de validation montre qu'une période d'initialisation d'au moins trois jours est nécessaire pour que les températures simulées soient cohérentes avec les températures mesurées. A la suite de cette période d'initialisation, la corrélation entre modélisation et expérimentation est bonne.

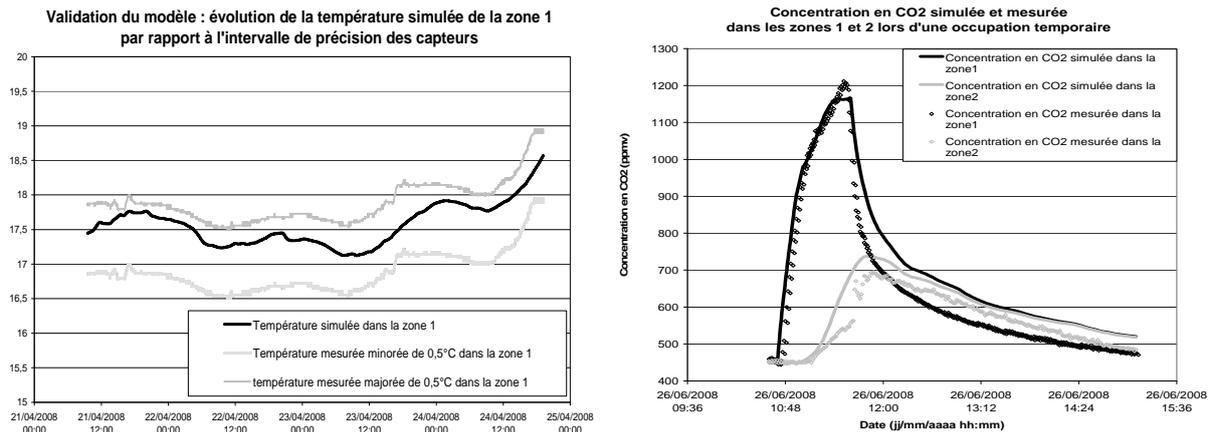


Figure 4 : Confrontation entre températures et concentrations en CO<sub>2</sub> mesurées et simulées

#### 4. STRATEGIES DE REGULATION D'UN BATIMENT MULTIZONE

Les premières simulations effectuées ont eu pour objectif de valider la pertinence d'une exploitation des ouvertures multizones dans le cadre d'une ventilation naturelle. Dans un premier temps, la ventilation mécanique par insufflation n'a donc pas été contrôlée. Le principe de cette première phase de contrôle réside dans la détermination d'un potentiel de ventilation naturelle important en fonction de l'écart de pression différentielle entre intérieur et extérieur au niveau d'un ouvrant. Lorsqu'une zone est considérée comme occupée, la ventilation naturelle se fait au travers du profilé aérateur, permettant de s'affranchir potentiellement d'une contrainte acoustique. Cette ouverture correspond à 6% de l'ouverture totale. Le schéma global de régulation pour ce type de stratégies est décrit par la figure 5.

La présence de deux seuils pour une variable (seuil1 > seuil2 pour le CO<sub>2</sub> et seuilDP1 > seuilDP2 pour les pressions différentielles) a pour objectif de minimiser le nombre de cycles afin d'économiser les actionneurs.

Dans un deuxième temps, des stratégies de régulation de la ventilation mécanique ont été greffées à la régulation par ventilation naturelle. Le principe de cette greffe est d'actionner la ventilation mécanique si la ventilation naturelle se montre insuffisante pour assurer une bonne qualité d'air. On définit deux seuils de concentration en CO<sub>2</sub> en tant qu'objectifs. A partir de 800 ppmv l'inconfort est susceptible d'apparaître. C'est le premier seuil. Une concentration en CO<sub>2</sub> de 1000 ppmv constitue dans cette étude le seuil critique. De manière similaire à la régulation par ventilation naturelle, deux seuils en CO<sub>2</sub> commandent le démarrage ou l'arrêt de la ventilation mécanique.

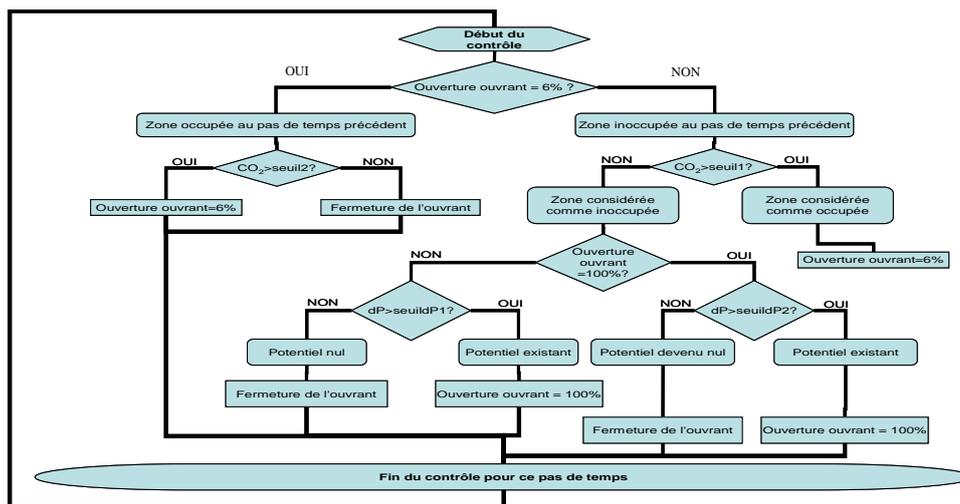
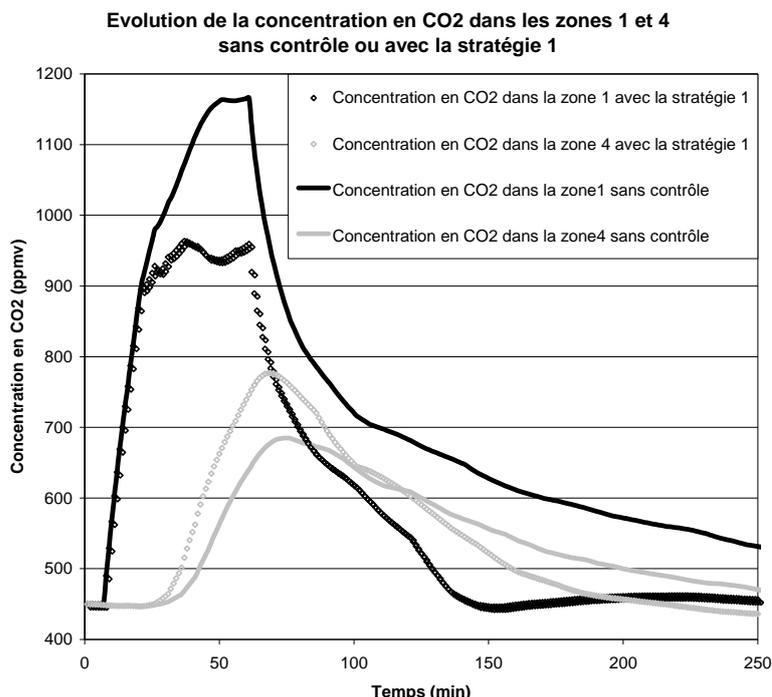


Figure 5 : Régulation d’assainissement par ventilation naturelle

### 5. RESULTATS ET DISCUSSION

Six stratégies simples sont présentées ici. Les stratégies 1 à 3 correspondent à des stratégies de ventilation naturelle uniquement tandis que les stratégies 4 à 6 reprennent la stratégie 3 en y associant de la ventilation mécanique. Les stratégies diffèrent par les valeurs de seuils. Les stratégies 2 et 5 montrent l’influence d’un écart plus important entre les deux seuils ( $CO_2$  ou  $dP$ ), les stratégies 3 et 6 montrent l’influence d’une diminution globale des valeurs seuils. Enfin, la stratégie 0 correspond à la référence, ou aucun contrôle n’est actionné. Des échantillons de résultats sont présentés sur la figure 6.

Figure 6 : Evolution des concentrations en fonctions de la zone et de la stratégie.



Les stratégies 1 à 3 permettent de valider l’hypothèse selon laquelle il est possible d’utiliser le caractère multizone du bâtiment pour réduire la concentration en polluant des zones occupées par la ventilation naturelle des zones non occupée. Cependant cette stratégie aboutit logiquement à l’augmentation de la concentration en  $CO_2$  des zones non occupées. Ce cas peut poser problème dans le cas d’une occupation réelle de ces zones dans un deuxième temps. Cependant, par le système de

seuil, une zone inoccupée dont la concentration en CO<sub>2</sub> est trop importante est gérée comme une zone occupée ce qui limite le transfert de polluant.

	CO2 moyen cumulé (ppmv)	Pic max CO2 (ppmv)	Temps cumulé au dessus du seuil1 (min)	Temps cumulé au dessus du seuil critique (min)	Renouvellement d'air (vol/h)	Nb de cycles	Temps de ventilation mécanique (min)
<b>Stratégie0</b>	614	1166	105	37	0,17	0	0
<b>Stratégie 1</b>	551	964	56	0	0,39	8	0
<b>Stratégie 2</b>	557	970	62	0	0,40	8	0
<b>Stratégie 3</b>	538	964	51	0	0,37	8	0
<b>Stratégie 4</b>	469	895	10	0	0,61	14	31
<b>Stratégie 5</b>	451	895	11	0	0,70	16	49
<b>Stratégie6</b>	455	895	9	0	0,70	20	41

Figure 7 : Efficacité de stratégies de contrôle simples.

La ventilation mécanique apparaît tout de même nécessaire pour assurer une meilleure qualité d'air. Les stratégies 4 à 6 montrent une nette amélioration de la qualité d'air (tableau de la figure 6). Le choix des seuils a des répercussions relativement faibles sur la qualité d'air (dans la mesure où ces seuils respectent des plages de valeur cohérentes), cependant il a une nette incidence sur l'usage des actionneurs.

## 6. CONCLUSION

La ventilation hybride exploitant le caractère multizone d'un bâtiment représente un potentiel intéressant. A partir des outils développés dans le cadre du projet ; la plateforme expérimentale et le modèle numérique, il est possible d'optimiser ces principes en les confrontant à des situations variées. L'amélioration des stratégies hybrides d'assainissement est encore nécessaire, et il sera important de voir par la suite comment ces stratégies peuvent se combiner à des procédures de rafraîchissement passif afin d'étudier de manière complète le potentiel de ventilation du système. L'étude de la relation entre la ventilation mécanique et le contrôle de l'ouvrant par mesure des pressions différentielles est aussi l'une priorité d'étude dans les stratégies à venir utilisant ce procédé.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- AICVF, *Conception et calcul des installations de ventilation des bâtiments et des ouvrages*, Pyc édition, 265p, 1992
- Allard.F 1998 : *Natural ventilation in building: a design handbook*. James & James Ltd 352 p
- Clarke J. A., *Energy simulation in building design*. Bristol and Boston: Adam Hilger Ltd, 1985, 388 p
- E. Dascalaki K. Van Der Maas. *Pass-port air : a multizone air flow model*. 1992.
- El Mankibi. *Développement et évaluation numérique et expérimentales de stratégies de régulation de la ventilation hybride*. INSA, 2003, 344 p
- Feustel. *Comis - an international multizone air-flow and contaminant transport Model*, Energy and Buildings, 2002, Vol34, p 873 -882
- Haas .A, Weber. A, Dorer V., Keilholz W., Pelletret R., *COMIS v3.1 simulation environment for multizone air flow and pollutant transport modelling*, Energy and Buildings, 2002, Vol34, p 873-882
- Orme, Leksmono. AIVC GUIDE 5 Ventilation modelling Data Guide. 2002, p.