

ANR  
212, rue de Bercy  
75012 PARIS

*A l'attention de M. Pascal BAIN*

**Convention ANR-08-HABISOL-007**

**QUAD – BBC**

**Qualité d'air intérieur et systèmes de ventilation dans les  
bâtiments à basse consommation d'énergie**

**Livrable Tâche 3  
Synthèse**

**Version finale – Janvier 2012**

## PARTENAIRES DU PROJET



### Personnes ayant contribué à ce rapport :

AIR.H :	Xavier BOULANGER	ALDES
	Laurent BROQUEDIS	UNELVENT
	Nicolas DUFOUR	ANJOS
	Marc JARDINIER	AERECO
	Damien LABAUME	ALDES
	Sabine PARIS	ATLANTIC
CETIAT :	Laure MOURADIAN	
CSTB :	Charles PELE	
	Pierre-Yves PAMART	
LEPTIAB :	Francis ALLARD	
	Juslin KOFFI	
ALLIE'AIR :	Anne-Marie BERNARD	
	Julien BOXBERGER	
INERIS :	Juliette LARBRE	

## SOMMAIRE

<b>1. ENJEUX ET PROBLEMATIQUE DU PROJET .....</b>	<b>1</b>
<b>2. RÉSULTATS OBTENUS.....</b>	<b>2</b>
2.1. Indices de QAI .....	2
2.2. Calculs, hypothèses de base sur les polluants et systèmes de référence .....	5
2.3. Principaux résultats sur les systèmes .....	6
2.3.1. Nouvelles stratégies de gestion des flux.....	6
2.3.2. Etanchéité à l'air du bâti .....	8
2.3.3. Le cas de la cuisine dans les logements étanches .....	9
2.3.4. Le comportement des occupants .....	10
2.3.5. Emission des matériaux.....	10
2.3.6. Aération par ouverture des fenêtres.....	12
2.3.7. Double flux et modulation .....	15
2.3.8. Débits réglementaires.....	16
<b>3. CONCLUSION .....</b>	<b>17</b>



## 1. ENJEUX ET PROBLEMATIQUE DU PROJET

L'évolution prévisible des bâtiments dans le contexte de la recherche d'une meilleure performance énergétique, illustrée par les axes d'améliorations suggérés par le Grenelle de l'environnement et déjà ébauchée par la RT 2012, impose un nouvel examen de la qualité de l'air dans les logements, les bureaux, les écoles, ...

La baisse drastique de la perméabilité à l'air de l'enveloppe en particulier interroge sur la possibilité pour les systèmes de ventilation existants ou pressentis d'assurer une qualité d'air acceptable sans le complément issu des fuites du bâtiment, dont on peut penser que l'apport était non négligeable jusqu'à maintenant.

En 1996 déjà les travaux du COST 17 rappelaient la primauté de la qualité d'air sur les mesures d'économies d'énergie<sup>1</sup>. Des interrogations subsistent 15 ans après sur l'existence de contre références dans les bâtiments à basse consommation d'énergie pour lesquels la performance énergétique aurait été atteinte au détriment de la qualité d'air intérieur (QAI).

Le projet QUAD BBC examine les interactions bâtiment / utilisateur / système en utilisant les données disponibles pour les bâtiments conçus pour une faible consommation, les sources de pollution liées à l'occupation, aux matériaux et au comportement des utilisateurs ainsi que plusieurs systèmes de ventilation.

L'objectif initial du projet était de proposer pour chaque type de bâtiment étudié un système de ventilation de référence, assorti de performances énergétiques et de qualité d'air (à travers un ou plusieurs indices de QAI selon les polluants). L'acceptation des autres systèmes aurait alors été liée à des niveaux d'indice acceptables vis-à-vis de cette référence, la performance énergétique découlant du calcul sur une année.

Les simulations et leurs analyses ont démontré la difficulté de la tâche : la définition des indices, la modélisation de certains phénomènes et leur impact sur les résultats, la multiplicité des sources bibliographiques très hétérogènes concernant les émissions de polluants par les matériaux, ..., ont conduit à privilégier une orientation plus nuancée et à une hiérarchisation des systèmes plutôt qu'à la définition d'une référence.

Ce rapport fait la synthèse de la tâche 3 et des principales conclusions issues des tâches précédentes et de l'analyse des systèmes dans les 4 bâtiments étudiés.

---

<sup>1</sup> Dans son 17<sup>th</sup> rapport "Indoor Air Quality and the use of Energy in Buildings" en 1996, l'action collaborative Européenne a sorti comme conclusion principale, que *"Both the rational use of energy and the provision for good IAQ are important aspects of building design and refurbishment. There are potential conflicts between these requirements. The impact of possible energy savings on IAQ should always be discussed before their eventual adoption and if unacceptable, this measure should be avoided"*.

## 2. RÉSULTATS OBTENUS

### 2.1. *Indices de QAI*

Une revue bibliographique étendue et assortie d'analyses pour certaines des sources a été mise à la disposition des partenaires du projet et utilisée pour la définition des systèmes et le choix des polluants ainsi que leurs niveaux d'émission.

Il est apparu que certaines dispositions réglementaires pourraient être vues comme des freins pour des systèmes non conventionnels ; la remise en cause totale des textes n'est pas nécessaire mais des précisions devront être apportées dans l'interprétation de paragraphes qui pouvaient être clairs dans un cadre de « système unique (moyens) » mais ne le sont plus avec une ouverture plus large (résultats).

Le choix des indicateurs et la définition des indices a d'abord été fait a priori et discuté en réunion de travail et en lien avec le groupe de pilotage. Les taux d'émissions, les limites acceptables ont été choisis à partir des contraintes réglementaires les plus fortes trouvées dans la littérature.

La décision initiale s'était portée sur un indice unique, sommant toutes les contributions de tous les polluants, avec un groupe d'une quinzaine de composés chimiques organiques, non organiques et particulaires. L'addition des polluants revient à prendre en compte l'additivité des effets, mais on note que l'interaction entre certains polluants peut avoir des effets plus grands que la somme des effets de chacun pris individuellement.

Ainsi l'indice de qualité d'air intérieur est calculé comme suit :

$$I_{QAI} = \sum_{p=1}^{Np} \left( \frac{C_p}{C_{lim,p}} \right)$$

Cette équation qui par exemple peut se décliner selon les locaux concernés :

- Locaux à pollution non spécifique (chambres, séjours, bureaux, salle de classe,...)

$$(écoles) \quad I_{QAI,écoles} = \frac{C_{H_2O}}{C_{lim,H_2O}} + \frac{C_{CO_2}}{C_{lim,CO_2}} + \frac{C_{HCHO}}{C_{lim,HCHO}} + \frac{C_{PM_{2.5}}}{C_{lim,PM_{2.5}}}$$

$$(habitat) \quad I_{QAI,habitat} = I_{QAI,écoles} + \frac{C_{Rn}}{C_{lim,Rn}}$$

$$(bureaux) \quad I_{QAI,bureaux} = I_{QAI,écoles} + \frac{C_{O_3}}{C_{lim,O_3}}$$

- Locaux à pollution spécifique (cuisine, salle de bain, douche, WC,...)

$$(douche) \quad I_{QAI,douche} = \frac{C_{H_2O}}{C_{lim,H_2O}} + \frac{C_{CO_2}}{C_{lim,CO_2}}$$

$$(WC) \quad I_{QAI,WC} = I_{QAI,douche} + \frac{C_{Odeurs}}{C_{lim,Odeurs}}$$

$$(cuisine) \quad I_{QAI,cuisine} = I_{QAI,douche} + \frac{C_{CO}}{C_{lim,CO}} + \frac{C_{NO_2}}{C_{lim,NO_2}} + \frac{C_{SO_2}}{C_{lim,SO_2}} + \frac{C_{Odeurs}}{C_{lim,Odeurs}}$$

Cependant la discussion a montré que tous les polluants n'avaient pas la même dangerosité, ne conduisaient pas à la même interprétation et qu'il était intéressant de maintenir 4 indices intermédiaires représentatifs de comportements et/ou d'effets similaires :

- le CO<sub>2</sub> seul, comme marqueur de confinement lié à l'occupation,
- NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> (logements) et O<sub>3</sub> (bureaux) liés à l'activité des occupants,
- CO et 7 COV liés aux matériaux, aux activités et au comportement,
- PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub> liées notamment aux activités.

Indice	Polluant	Valeur / 1 h	Source
A	Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	10 000 ppm	MAK
B	Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	0,2 mg/m <sup>3</sup>	OMS, 2005
	Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	0,66 mg/m <sup>3</sup>	OEHHA, 2008
	Ozone (O <sub>3</sub> )	0,12 mg/m <sup>3</sup>	EPA
C	Monoxyde de carbone (CO)	30 mg/m <sup>3</sup>	Anses, 2007a
	Formaldéhyde	0,05 mg/m <sup>3</sup> (2 h)	Anses, 2007b
	Acétaldéhyde	0,47 mg/m <sup>3</sup>	OEHHA, 2010
	Éthylbenzène	43,36 mg/m <sup>3</sup>	ATSDR, 2010
	Styrène	21 mg/m <sup>3</sup>	OEHHA, 2010
	Toluène	3,8 mg/m <sup>3</sup>	ATSDR, 2010
	o-Xylène	8,7 mg/m <sup>3</sup>	ATSDR, 2010
	Acétone	31 mg/m <sup>3</sup>	
D	Particules 10 µm	50 µg/m <sup>3</sup> (24 h)	OMS, 2005
	Particules 2.5 µm	25 µg/m <sup>3</sup> (24 h)	OMS, 2005

NB : la valeur du formaldéhyde est exprimée sur 2h, celles des particules sur 24h et les autres polluants sur 1h.

De ce fait, l'indice unique regroupant ces 4 indices est difficile à obtenir. Sa valeur cumulée n'est pas directement lisible et interprétable alors que les indices par groupe sont assez lisibles. En valeur absolue, leur valeur s'approche de 1 si on approche la limite de concentration ci-dessus en moyenne glissante sur 1 h. Chaque indice n'est calculé que sur les périodes d'occupation car ils sont définis relativement aux effets sanitaires sur la personne et n'ont de signification qu'en cas de présence dans la pièce. Enfin, les 4 indices sont calculés pour chaque local : la comparaison est plus aisée pour une grande classe d'école que pour un logement pour lequel il faut considérer chaque pièce séparément pour éviter des conclusions erronées. Une approche par bâtiment serait possible si on définissait précisément les mouvements des occupants dans les scénarii et si on suivait l'occupant dans son mouvement entre les différentes pièces (approche par budgets espace-temps). Par manque de temps, ce regroupement n'a pas été tenté. Il faut aussi réfléchir au calcul de la moyenne glissante horaire lorsque l'émission ne dure pas longtemps ou que la présence n'est que partielle sur la période.

Enfin, pour permettre une représentation sur un graphe radar de l'indice, il est essentiel que l'échelle soit identique pour tous. C'est pourquoi on a d'abord tracé des radars en indice relatif, c'est-à-dire ramené au maximum de tous les indices pour le local considéré. Ceci pose quelques problèmes car la valeur de référence change d'un local à l'autre et on perd la lecture directe de l'indice vis-à-vis de la valeur 1 (concentration limite). La représentation graphique a le mérite par contre de bien visionner les écarts de comportements entre plusieurs systèmes. Une autre alternative est un affichage des radars en valeur absolue des indices de QAI (1= concentration limite choisie) et en valeur relative pour l'énergie (consommation / consommation maxi) et l'humidité (nombre d'heures supérieures à 75% / nombre d'heures maxi).

Une remarque spécifique est faite sur l'indice A de confinement ( $\text{CO}_2$ ). Dans l'étude la valeur limite prise est de 10 000 ppm sur 1h mais vu que ce n'est pas le  $\text{CO}_2$  en tant que polluant mais les bio-effluents qui nous concernent ici, cet indice devrait plutôt être calculé avec une limite à 1 000 ppm (RSdT) en tertiaire et une valeur à choisir en habitat (le RSdT n'a pas fixé de valeur et on tolère généralement plus nos propres bio-effluents, les exigences de qualité d'air définies dans les Avis Techniques sont calées sur le critère ppm.h cumulé en base 2 000 ppm).

En conclusion, les indices semblent donc permettre une bonne vision du comportement du système, mais la définition d'un seul indice cumulatif n'a pas été jugé pertinente. La proposition actuelle de 4 indices semble cohérente et permet d'analyser rapidement les performances des systèmes de ventilation, en complément avec d'autres critères. Des discussions peuvent avoir lieu sur le calcul de l'indice (actuellement, moyenne en période d'occupation) qui pourrait passer en maximum si la valeur limite devait être strictement réglementaire. On pourrait éventuellement envisager dans le futur de suivre l'occupant dans ses déplacements entre locaux pour s'approcher d'une notion d'exposition journalière et permettre une vision globale de la performance du système sur l'ensemble des locaux. Cette vision sera alors soumise au scénario retenu. L'étude a montré que les indices sont

intéressants pour une vision rapide mais que le cumul reste de toutes façons délicat et demande à être complété par des analyses plus fines (par polluant, par évolution dans le temps...) pour être pertinent.

La visualisation des indices sous forme de radars peut aussi intégrer les autres dimensions du système étudié comme par exemple le critère d'humidité relative qui est très impactant.

Enfin il a paru intéressant de rajouter une dimension énergétique si on voulait avoir une idée comparative des systèmes de ventilation pour chaque pièce.

## **2.2. Calculs, hypothèses de base sur les polluants et systèmes de référence**

Les premiers calculs ont montré la puissance potentielle de l'outil retenu pour les simulations mais aussi sa complexité et la finesse dans la description de tous les éléments nécessaires au calcul. La très forte flexibilité de SIMBAD et ses bibliothèques de composants comme le découpage extrême de chaque élément est un formidable atout ... mais aussi un risque permanent puisque chaque simulation fait l'objet d'une redéfinition complète et qu'il suffit d'un manque, un oubli ou un lien différent pour que le résultat ne soit plus directement comparable aux précédents ou aux suivants. Chaque précision, correction, amélioration doit être réimplantée pour tous les calculs avec les risques correspondants.

La profusion des résultats entraîne nécessairement une agrégation et une synthétisation de ceux-ci pour une présentation plus fluide au groupe de travail : la finesse initiale se perd et seuls de nombreux allers-retours entre résultats exhaustifs et synthétiques permettent de valider (ou invalider ...) les calculs.

L'utilisation de systèmes de ventilation réagissant aux polluants entraîne une complexité complémentaire et rendent la compréhension des interactions et donc les résultats plus difficiles à comprendre. Il a été décidé à partir de ces doutes de réaliser des simulations complémentaires sur des systèmes simples et connus (simple flux autoréglable à débits constants et double flux à débit constant) pour valider définitivement les transcriptions des hypothèses en code « sûr ».

A cette occasion certains solveurs internes aux bibliothèques disponibles ont du être modifiés, en particulier sur l'évolution de l'humidité quand il y a condensation (les travaux de l'annexe 41 de l'IAE avait déjà pointé l'extrême difficulté de cette modélisation).

Il est rapidement apparu, à l'analyse des premiers résultats de simulations sur des systèmes simples que cette approche ne permettait pas de qualifier correctement le comportement des systèmes et que la compréhension des contributions relatives de chaque polluant à l'indice se révélait impossible.

La base de données de polluants utilisée (principalement PANDORE) est très riche et les choix faits en première partie (a priori) ont été modifiés en cours d'étude pour simplifier l'approche et affiner l'impact de certains comportements, certains polluants ayant été supprimés.

Plusieurs représentations de l'évolution des polluants ont été examinées afin de retenir les plus utiles à l'analyse des comportements et systèmes : cumul, évolution temporelle sur une journée type, une semaine, fréquence simple, fréquence cumulée, radar avec ou sans normalisation des indicateurs... Chacune de ces représentations appelle une analyse pertinente ... qui nous renvoie à l'objectif initial de définition d'un système de référence !

La multiplicité de réactions des systèmes et les impacts différents dans une zone ou l'autre du bâtiment, à une époque ou une autre de l'année, dans des conditions d'utilisation variables inversent parfois certaines hiérarchies.

L'indice unique était bien entendu la clé d'une hiérarchie globale mais celui-ci induit des effets pervers qui perturbent les résultats voire les faussent.

Le nombre de polluants suivis est un biais majeur de la méthode de l'indice cumulatif puisque plus le nombre augmente plus le risque d'avoir un mauvais résultat augmente (pour tous les systèmes).

La pondération des effets se révèle un exercice très difficile dès lors que les niveaux sont tous très bas ou au contraire très élevés ou encore quand l'un des indices prend le pas sur tous les autres, surtout s'il est lié au comportement des occupants (cigarette, encens ...).

La fiabilité relative de la bibliothèque d'émission des équipements et des matériaux est aussi un obstacle majeur à des indices fiables (et a fortiori à un seul indice) : il est très difficile de connaître les conditions dans lesquelles les mesures ont été faites, voire la méthode utilisée. Les chiffres sont précis mais l'incertitude sur les mesures généralement absente, des échelles de 1 à 10 peuvent se rencontrer sous le même intitulé (bougie, encens, ...); la transcription est donc particulièrement délicate quand il faut passer à une valeur conventionnelle d'émission qui va déterminer une valeur d'acceptation pour un système ou un autre.

### **2.3. Principaux résultats sur les systèmes**

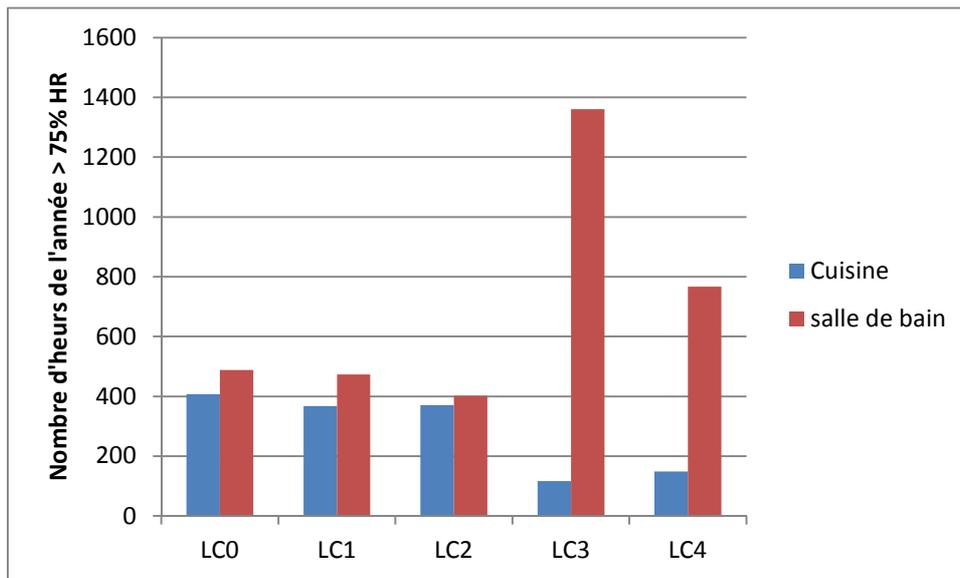
Les résultats obtenus et analysés permettent néanmoins de constater des effets clairs quelles que soient les hypothèses retenues et des tendances parfois différentes des intuitions initiales.

#### **2.3.1. Nouvelles stratégies de gestion des flux**

Il est important d'optimiser la ventilation en dirigeant l'air dans le logement là où les occupants sont et quand ils y sont. Néanmoins, si ces stratégies s'avèrent prometteuse, il faut être prudent avec les choix faits.

La figure 1 présente le nombre d'heures supérieures à 75% en HR et montre que l'humidité dans les pièces humides est fortement dégradée par rapport aux systèmes conventionnels :

- Pour le système LC3 qui ne ventile ces pièces que pendant la présence et n'évacue de fait pas la production réalisée (douches...)
- Pour le système LC4 qui arrête sa ventilation au départ des occupants alors que 2 jours par semaine on suppose une lessive en train de sécher la journée.



**Figure 1 : Nombre d'heures de forte concentration en H<sub>2</sub>O selon les systèmes en collectif**

En maison individuelle, le débit sortant des chambres est très inférieur à celui de dimensionnement. En séjour, les entrées d'air pilotées au CO<sub>2</sub> restent en grande ouverture pendant la période d'occupation de la soirée (jusqu'à 23 heures) et au-delà, pendant le temps de la purge (le seuil est à 800 ppm). De ce fait, la bascule entre le séjour et les chambres ne s'effectue complètement qu'à 3 h le matin. Ce décalage, dû à un mouvement progressif de la famille vers les chambres et combiné à un sous-dimensionnement de l'extraction rend le système non performant.

Si les systèmes de ventilation double-flux se positionnent en général mieux que les simples flux, comme on pouvait s'y attendre, l'introduction de mode de gestions « standards » visant à améliorer encore leur efficacité (zonage, transfert, ...) peut se révéler contre-productive en terme de qualité d'air à certains moments, surtout si cette gestion standard s'avère mal adaptée au scénario (ex : transfert nocturne dans les chambres avec un salon occupé en début de nuit, système MI3, arrêt de la ventilation du fait du départ des occupants avant que l'humidité ne soit évacuée ou pendant que du linge sèche, système LC4). **Ceci rappelle sans cesse que les gestions doivent être les plus automatisées possibles afin de suivre une occupation réelle et variable.**

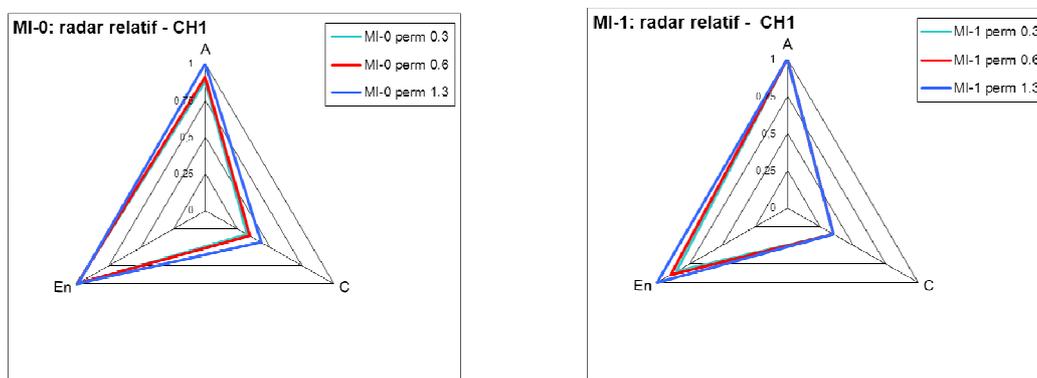
On notera quand même qu'il est possible d'améliorer la QAI sans pénalité thermique par exemple :

- Par une meilleure gestion des flux d'air différents le jour et la nuit pour le double flux de la maison individuelle ou du logement (MI-4, LC-4).
- Par le déplacement d'air qui présente une meilleure efficacité de ventilation en écoles (ENS 5).

### 2.3.2. Etanchéité à l'air du bâti

L'amélioration de l'étanchéité à l'air des bâtiments améliore la performance des systèmes simple flux en donnant plus d'autorité aux entrées d'air (la baisse des flux traversants liés aux fuites est compensée par une meilleure maîtrise des flux entrants).

Pour les deux types de systèmes, en maison individuelle par exemple, on note que le passage à des bâtiments très étanches permet de retrouver le transfert d'air théoriquement prévu et améliore la QAI (concentration en polluants). Ainsi, dans cette maison à deux étages, l'air entrant par les chambres à l'étage descend jusqu'à la cuisine lorsque la perméabilité à l'air est de 0,3 à 0,6 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> (sous 4 Pa) alors qu'au-delà, le tirage thermique dans le logement ne le permet pas. Ce sont les fuites qui équilibrent les étages, tandis qu'une partie de l'air entrant dans le séjour monte inutilement vers l'étage.



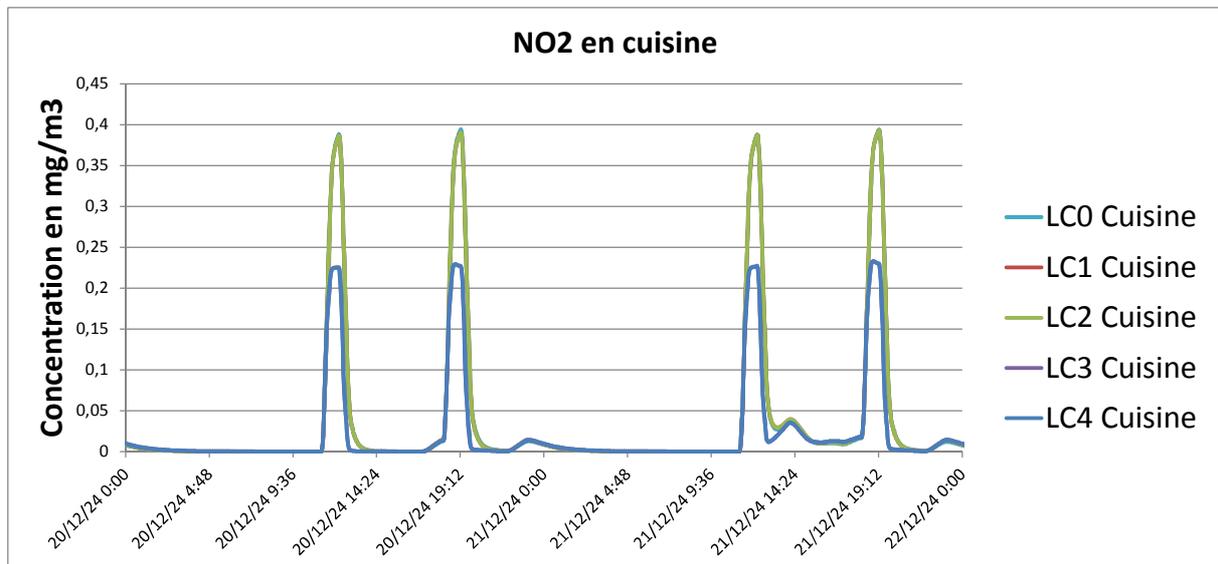
**Figure 2 : exemple de gain sur les indices de QAI et l'énergie en simple flux et en double flux sur la chambre 1 à l'étage de la maison individuelle**

En résumé donc, le renforcement de l'étanchéité du bâti qui trouve son origine dans la volonté d'améliorer la performance énergétique ne nuit pas à la QAI. Au contraire, elle tend à renforcer le cheminement prévu de l'air dans le logement, ce qui améliore la QAI notamment dans les pièces où le traversant venait le perturber (ex : chambres de l'étage en simple flux en individuel, indice C amélioré de 20 à 25%, indice A d'une dizaine de %). En collectif, un gain similaire (11% en indice A et 17% en C) est constaté sur la chambre en passant la perméabilité de 1,7 à 0,3 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>@4 Pa. En séjour, en collectif ce gain est d'environ la moitié.

En double flux, le gain constaté sur les transferts de débit ne suffit pas à amener une amélioration sensible. Il n'y a pas de dégradation dans les pièces de vie. On peut par contre encore gagner 15% sur la consommation énergétique (en effet Joule, météo Trappes) en réduisant la perméabilité à 0,3 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>@4 Pa par rapport à 1,3 en maison individuelle.

### 2.3.3. Le cas de la cuisine dans les logements étanches

Les concentrations en dioxyde d'azote dans la cuisine collective sont données par la figure 3 pour un vendredi et un samedi pour l'ensemble des systèmes en ayant fait la moyenne pour une exposition horaire.



**Figure 3 : Concentration du dioxyde d'azote en cuisine du logement collectif pour les différents systèmes de ventilation étudiés**

Les courbes sont superposées en deux lots : les systèmes qui ont un grand débit cuisine (LC0, LC1, LC2) et ceux qui ont une hotte à double flux (LC3 et LC4) qui abaisse ce taux de moitié mais ce qui n'est pas encore suffisant pour ne pas dépasser le seuil horaire demandé par l'OMS de 0,2 mg/m3. Sans cette hotte, (LC0,LC1,LC2) les niveaux sont des niveaux doubles situés à 0,4 mg/m3. Par extrapolation, l'absence du débit de point cuisine dans ce logement donnerait des niveaux plus de 2 fois supérieurs (exactement dans un ratio de 105/45) soit de 0,93 mg/m3 soit presque cinq fois supérieur au taux atteint. **Même si ces résultats sont liés aux hypothèses d'émission, nous pouvons conclure à l'importance du maintien du grand débit cuisine en l'absence de hotte spécifique à extraction.**

D'autre part, **la présence de hotte en cuisine, avec son amenée d'air locale, améliore nettement les performances en termes de qualité d'air dans cette pièce et peut être recommandée.** Ceci est assez logique du fait de l'amélioration de l'efficacité de captage qui leur permet de s'éloigner de la valeur limite de concentration sur les principaux polluants (NO<sub>2</sub>, formaldéhyde). En revanche, elles limitent également en simple flux les apports d'air neuf dans les chambres.

Le temps de présence dans la cuisine étant parfois différent d'une durée d'une heure, l'exposition réelle peut s'en trouver amoindrie...ou augmentée.

Les indices du fait de leur moyenne en occupation et du fait qu'ils cumulent par indice plusieurs polluants ne dépassent pas la limite de 1 malgré ce dépassement du NO<sub>2</sub> comme

le montre la figure ci-après. On retrouve bien par contre sur l'indice B les deux regroupements avec et sans hotte.

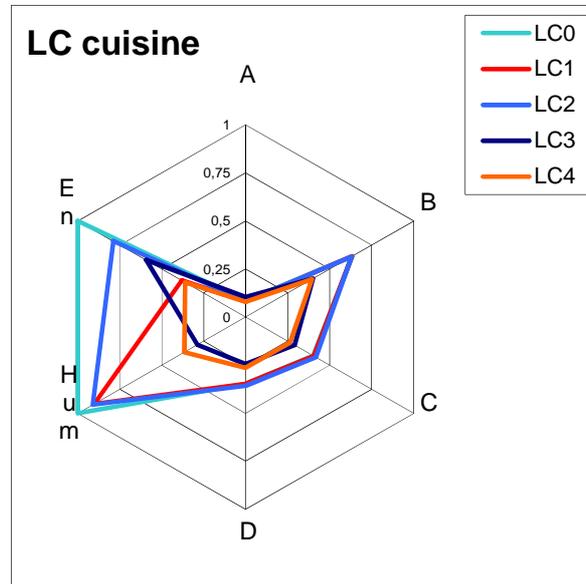


Figure 4 : Radar multicritères en cuisine du logement collectif en indices absolus

### 2.3.4. Le comportement des occupants

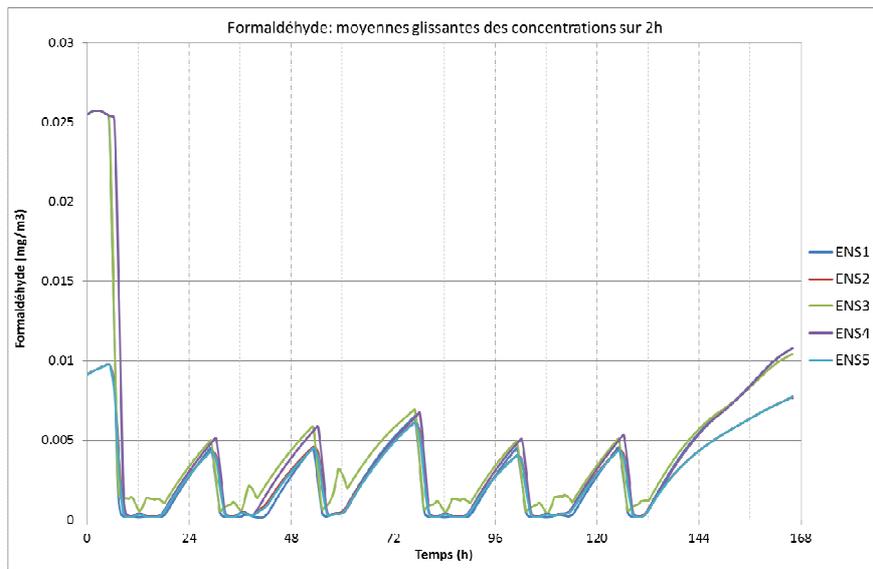
Le comportement des occupants peut parfois être plus impactant sur le résultat que le système choisi.

En maison individuelle et en logement collectif, l'usage de l'encens ou de la cigarette est nettement plus impactant sur les indices de QAI que les émissions propres des matériaux. Les hypothèses sur les valeurs des émissions de polluants de ces produits et sur les scénarios d'utilisation influencent également les résultats de QAI finaux et méritent d'être bien calées (Cf. §2.2).

### 2.3.5. Emission des matériaux

Sur le formaldéhyde, les cas simulés dans les bureaux et la salle de classe montrent une augmentation des concentrations la nuit et le week-end lorsque la ventilation est coupée en absence d'occupants, ce qui n'apparaît pas dans les logements où la ventilation est permanente.

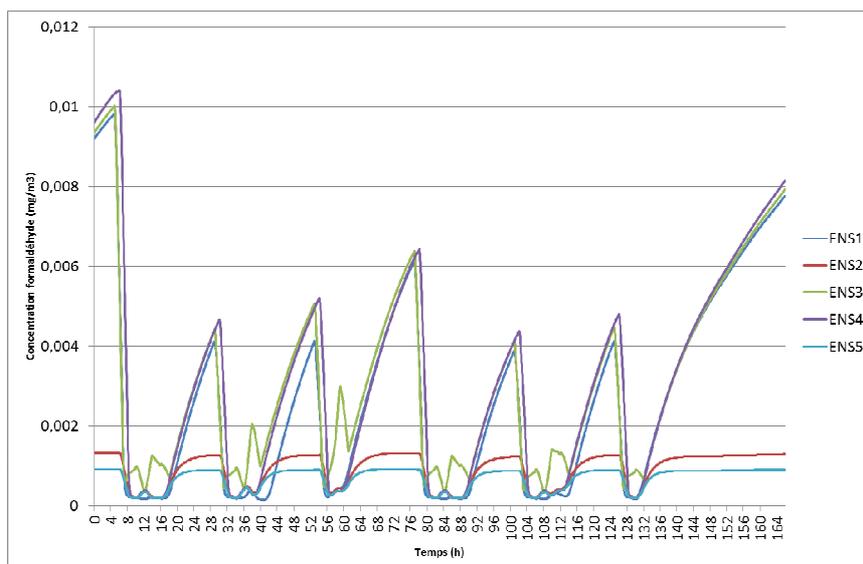
La courbe ci-après donne l'exemple, dans les écoles, de l'évolution du formaldéhyde) sur une semaine ; on note une forte augmentation la nuit pour tous les systèmes lorsque la ventilation est arrêtée (figure 5).



**Figure 5 : Evolution du formaldéhyde en salle de classe sur une semaine pour les 5 systèmes de ventilation étudiés, tous coupés hors occupation**

Ces évolutions ont également été constatées dans les bureaux.

La figure 6 représente les mêmes systèmes mais deux des systèmes double flux (ENS 2 et ENS 5) maintiennent maintenant 10% du débit de ventilation la nuit (et le week-end) alors que les autres systèmes la coupent, on note une nette différence entre les deux modes de fonctionnement.



**Figure 6 : Evolution du formaldéhyde en salle de classe sur une semaine, systèmes ENS2 et ENS5 maintenus à 10% hors occupation, les autres coupés**

Pour les écoles comme pour les bureaux, les indices restent cependant corrects. Ceci permet de montrer que la purge par une remise en route 1 heure avant la rentrée des cours reste suffisante pour les hypothèses d'émissions prises en compte ici (une purge plus longue pourra être nécessaire pour des absences plus longues comme les fermetures pour congés). On note qu'on a fait le choix de calculer les indices sur la présence (occupation) mais que les mesures sur site, en passif (tubes) donnent une valeur moyenne qui elle intègre aussi bien ces remontées nocturnes que les valeurs en occupation.

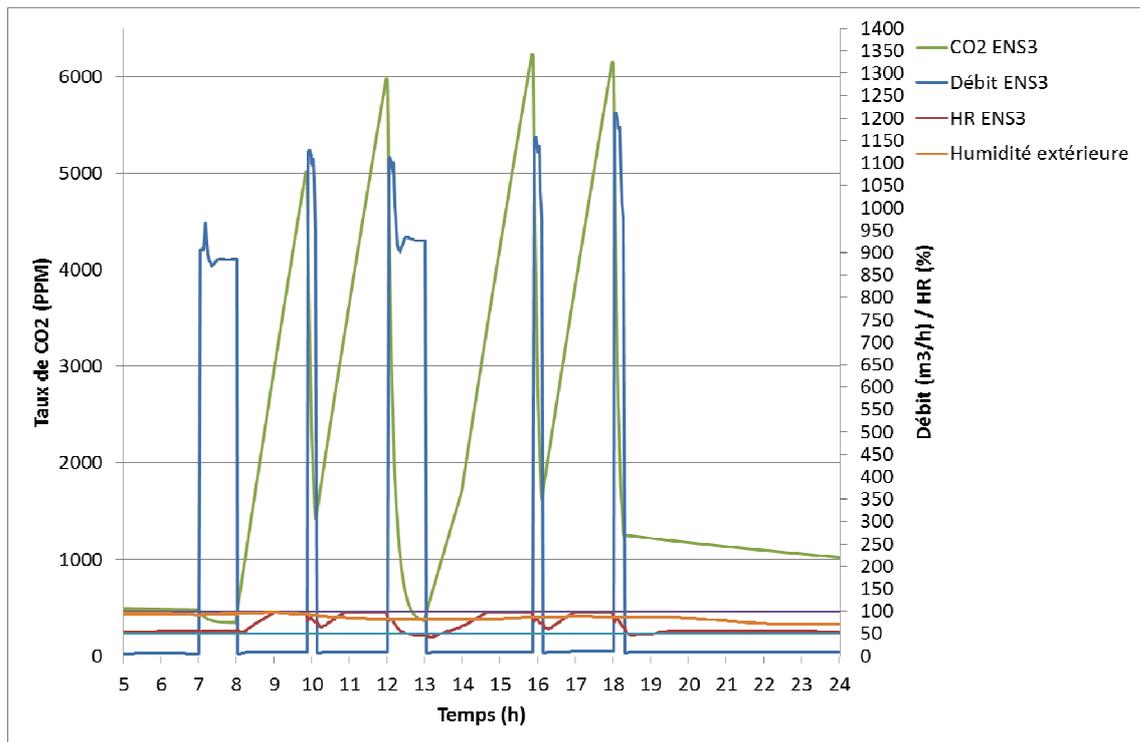
*NB : On a comparé le niveau de formaldéhyde à la valeur de l'OMS intégrée sur 2 heures ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) : or, le décret français du 2 décembre relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène propose déjà des valeurs instantanées de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour l'horizon 2015 et de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à l'horizon 2023, ce qui multipliera les valeurs de nos indices d'autant.*

La question est souvent posée de savoir si lorsqu'un système module et réduit son débit, il traite encore suffisamment les émissions des matériaux, voire s'il faut augmenter les débits nominaux pour le faire. **On note ici que, pour les hypothèses d'émissions prises et pour tous les bâtiments considérés (habitat et tertiaire), tous les systèmes ont permis de traiter les émissions considérées (hypothèse de calcul), de façon très satisfaisante dans les pièces de vie et les locaux à occupation humaine.** Il faudra confronter cette conclusion issue de simulations et de leurs hypothèses à des mesures sur site.

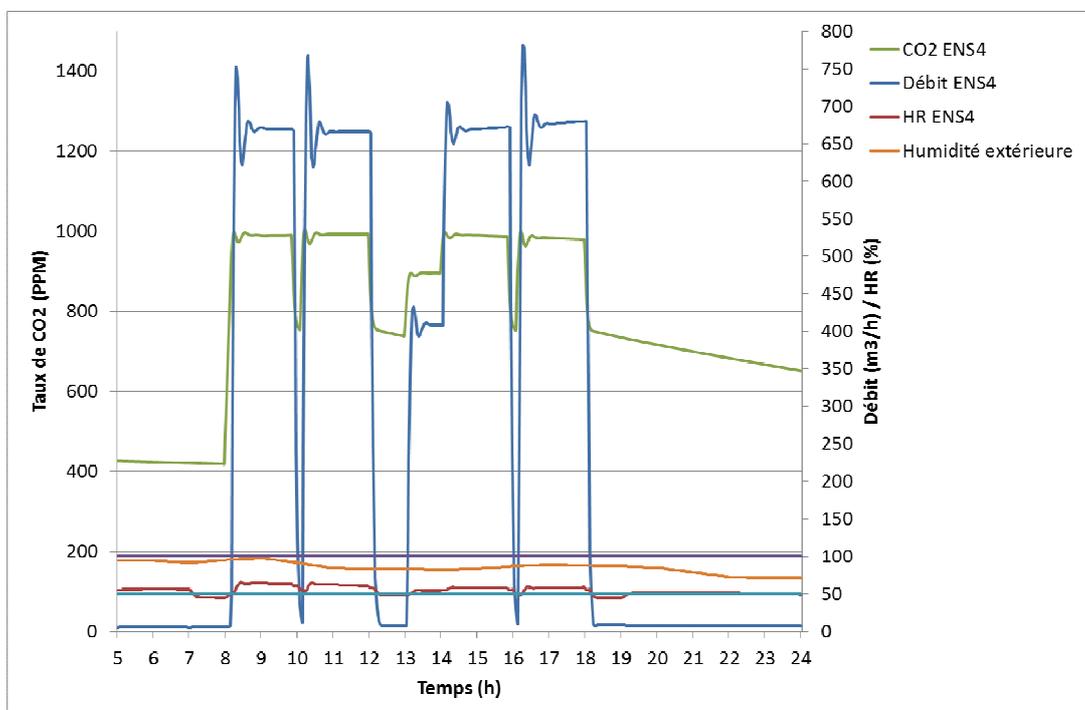
### 2.3.6. Aération par ouverture des fenêtres

L'utilisation manuelle des fenêtres en enseignement (ouverture aux intercourts et pendant les absences) ne permet pas d'assurer une qualité d'air correcte. Le confinement est trop important et la production des bio-effluents trop forte dans une salle occupée pour permettre que les indices restent corrects, ils dépassent les limites dès le premier quart d'heure de cours et montent au-delà de 6000 ppm. La figure 7 montre que même pour un débit important dû à l'ouverture pendant l'intercourt (une dizaine de vol/h), le  $\text{CO}_2$  redescend difficilement, mais surtout remonte très vite lors de la fermeture de la fenêtre. Du fait de l'étanchéité assez bonne pour du tertiaire ( $1,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2@4 \text{ Pa}$ ), le confinement est sensible et l'humidité intérieure monte fortement. Sur l'année, plus de trois mille heures sont reportées au-delà de 75% d'humidité, ce qui montre un risque grave de condensations et nuit à la santé des occupants et à la pérennité du bâti.

Le système qui module l'ouverture des fenêtres en fonction du  $\text{CO}_2$  s'avère correct en terme de QAI mais montre que la fenêtre reste ouverte pendant l'essentiel de la journée, ce qui n'est pas viable du point de vue du confort (thermique, acoustique) ou de l'énergie.



**Figure 7 : ENS3 (ouverture des fenêtres) - graphique présentant le taux de CO<sub>2</sub>, l'humidité relative (intérieure et extérieure) et le débit de ventilation en fonction du temps (sur une journée d'hiver, température moyenne de 11 °C et vent moyen de 5 m/s) dans une salle de classe occupée par 35 enfants.**



**Figure 8 : ENS4 - graphique présentant le taux de CO<sub>2</sub>, l'humidité relative (intérieure et extérieure) et le débit de ventilation en fonction du temps (sur une journée d'hiver, température moyenne de 11 °C et vent moyen de 5 m/s) dans une salle de classe occupée par 35 enfants.**

Ceci est montré par l'exemple d'une journée en figure 8. Le taux de CO<sub>2</sub> ne dépasse pas 1000 ppm mais la fenêtre qui commence à s'ouvrir à 750 ppm reste en fait ouverte pendant toute l'occupation. Le débit qui passe est variable selon la météorologie mais généralement de 130 à 200% celui de la VMC, ce qui explique un positionnement énergétique assez moyen de cette option. L'option n'est pas viable car elle implique en occupation trop d'inconforts (bruit extérieur, courant d'air...) du fait de cette forte durée d'ouverture en présence (1688 heures/an soit 81% du fonctionnement de la VMC).

La représentation en indice (figure 9) montre clairement la comparaison du comportement des systèmes. L'ouverture des fenêtres (ENS3, bleu vif) est clairement mauvaise sur tous les indices de QAI, y compris l'humidité. Le système d'ouverture des fenêtres modulé (ENS4, bleu foncé) rejoint par contre les systèmes mécaniques avec de bons indices en QAI et se positionne de façon moyenne en énergie. Le confort n'a pas été inclus dans cette approche visuelle.

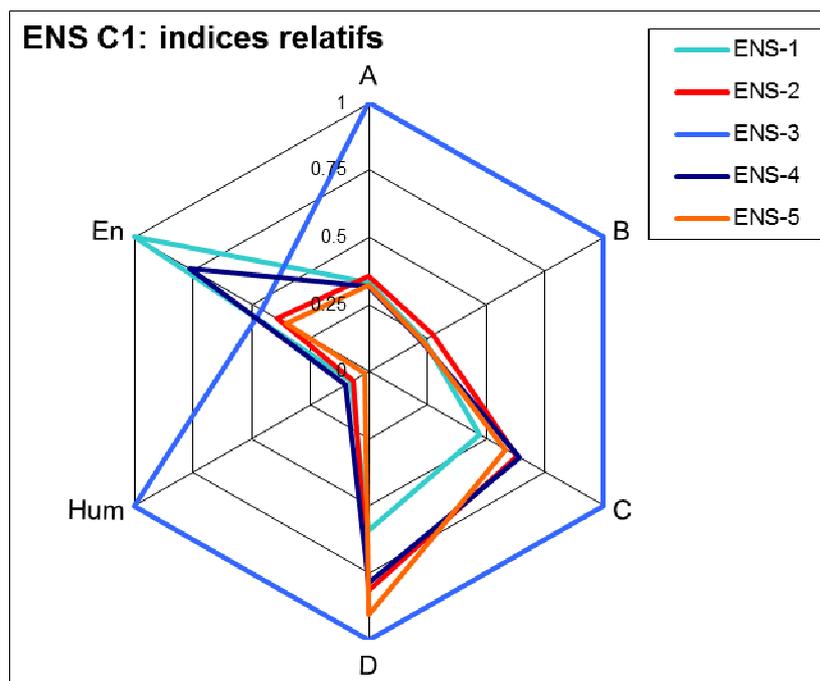
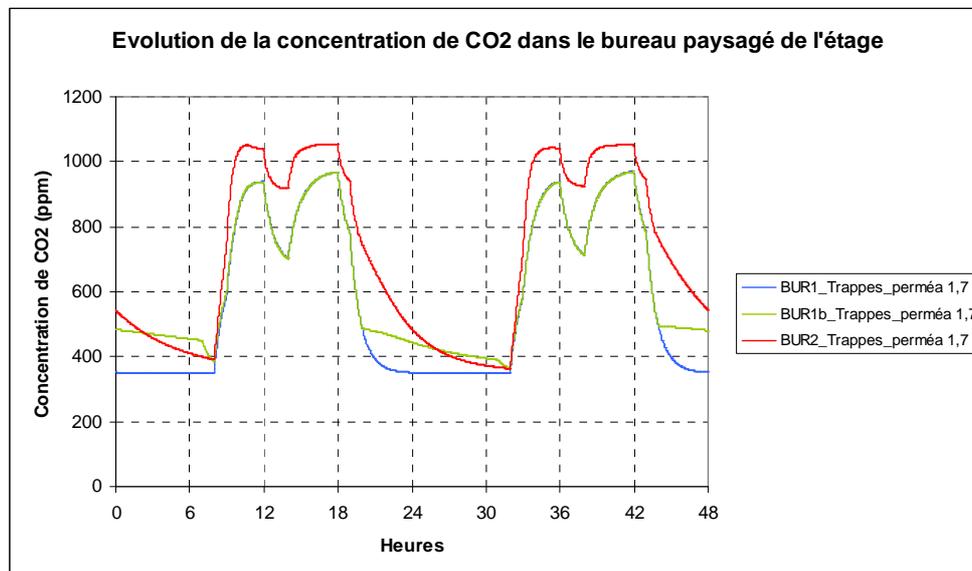


Figure 9 : indice moyen annuel relatif dans la salle de classe 1, indice moyen annuel en occupation

### 2.3.7. Double flux et modulation



**Figure 10 : Variation temporelle de la concentration de CO<sub>2</sub> dans un bureau paysagé**

Dans les bureaux, les 3 systèmes sont des double-flux : à débit fixe permanent (BUR1), à débit fixe avec une horloge pour coupure nocturne (BUR1b) et à débit modulé.

Dans les écoles, les systèmes de ventilation mécanique étudiés sont également trois systèmes double flux.

Dans tous les cas tertiaires, on note que les double-flux à débit constant permettent une montée moins rapide de la concentration en CO<sub>2</sub> et en formaldéhyde et purgent le plus rapidement de par son débit constant. Les double-flux modulés en CO<sub>2</sub> ont un délai de réaction un peu supérieur mais présentent les mêmes caractéristiques (le pic est défini par le dimensionnement du système à 700 ppm de CO<sub>2</sub> au-dessus de l'extérieur conformément aux Avis Techniques); leur intérêt est énergétique.

La combinaison d'un double flux modulé avec une ventilation par déplacement, étudiée seulement en enseignement dans cette étude, est le système le plus performant en QAI, grâce à l'efficacité de ventilation forte sur les polluants gazeux légers, et en énergie.

Les résultats énergétiques montrent que la modulation n'est pas inutile, même en double flux, puisqu'elle permet de réduire le poste des consommations des auxiliaires. Ceci se note pour tous les types de bâtiments tertiaires (écoles, bureaux).

Dans les bâtiments tertiaires, la coupure la nuit est essentielle pour ne pas dépenser inutilement trop d'énergie, surtout la nuit. L'horloge nécessaire à cette coupure est obligatoire depuis la RT88 mais il existe encore de nombreuses installations non équipées dans l'existant alors que c'est une économie sensible et simple à faire.

En logement comme en maison individuelle, il est pertinent de transférer en double flux des débits vers la zone de principale occupation (nuit vers les chambres, jour vers le séjour), mais il convient de s'assurer que le système suive automatiquement le mouvement des occupants et non de manière programmée par une horloge (exemple : longue soirée dans le séjour). Sinon, il faut alors a minima permettre une dérogation facile sur le programme horaire préprogrammé.

### 2.3.8. Débits réglementaires

Les débits actuellement mis en œuvre dans les réglementations existantes semblent apporter une qualité d'air acceptable aux locaux à basse consommation d'énergie, écoles, bureaux et logements.

Les débits de ventilation de Mars 1982 semblent convenir pour traiter correctement les logements. Les émissions des matériaux, pour les hypothèses prises ici, sont bien évacuées pour tous les systèmes. Dans les pièces de vie et notamment la chambre des parents, les niveaux de CO<sub>2</sub> sont à surveiller particulièrement, mais les systèmes choisis pour l'étude répondent correctement. En salle de bain, le critère de l'humidité reste vraiment le plus critique et reste à surveiller. En cuisine par contre, les émissions liées à la cuisson font que dans un logement très étanche, on s'approche dangereusement du seuil de l'OMS même en utilisant le grand débit. Les systèmes avec hotte de cuisine, conçue pour avoir une meilleure efficacité de captage de polluant et avec amenée d'air spécifique, améliorent ce traitement. Il faudra également veiller à ce que tout appareil de combustion non étanche qui pourrait avoir un effet similaire sur le séjour soit exclu ou traité spécifiquement.

Les débits de ventilation en tertiaire semblent également suffisants. La purge mentionnée par le RSDT est utile pour évacuer les polluants des locaux en fin de journée mais il convient surtout de prévoir un redémarrage avant occupation (1h semble suffire pour la coupure nocturne et de week end, plus longuement en retour de congés) afin de purger les locaux des émissions des matériaux qui s'accumulent lorsque la ventilation est coupée hors occupation.

La question est souvent posée de savoir si lorsqu'un système module et réduit son débit, il traite encore les émissions des matériaux, voire s'il faut augmenter les débits nominaux pour le faire. On peut noter ici que, pour les hypothèses d'émissions prises, tous les systèmes permettent de traiter ces émissions, de façon très satisfaisante dans les pièces de vie. Il faudra confronter cette conclusion issue de simulations et de leurs hypothèses à des mesures sur site.

Deux éléments peuvent modérer ces constatations :

- les systèmes ont été simulés avec leurs caractéristiques nominales, sans perte de charge des conduits, sans déséquilibre ni fuite de débit et en considérant une étude et une mise en place parfaite.
- Les niveaux d'émission de polluants retenus ne sont peut être pas représentatifs des niveaux réels : le métabolisme a été négligé pour les COV, les niveaux extérieurs n'ont pas été pris en compte excepté pour l'humidité et le CO<sub>2</sub>, ...

Enfin, comme on l'a déjà noté pour la maison individuelle et le logement collectif, la fonction « grand débit » en cuisine est nécessaire et les valeurs de débit ne doivent pas être réduites pour correctement traiter les logements étanches.

### **3. CONCLUSION**

La modélisation des comportements des systèmes de ventilation est un outil puissant d'optimisation des stratégies de gestion des débits qui nécessite des bases logicielles stables et des hypothèses validées d'émission de polluants. Les outils de calcul doivent toutefois encore progresser en simplicité et en convivialité pour permettre une saisie des paramètres avec un minimum d'erreur.

Les indicateurs de CO<sub>2</sub> (cumul ppm-heure) et d'humidité (durée ou occurrence des périodes à plus de 75%) sont fiables et utilisables pour l'évaluation de la performance QAI des systèmes de ventilation. Cependant, les indices pour les autres polluants semblent encore immatures en particulier par la difficulté de disposer de données fiables d'émissions ainsi que des valeurs-seuils qui sont le fondement de ces indices.

**L'étude a permis de répondre à la question principale posée : il est possible, même avec des systèmes existant aujourd'hui et sans modifier les débits actuels, de disposer d'une qualité d'air satisfaisante dans les bâtiments basse consommation pour les hypothèses d'émissions retenues. On constate même que l'amélioration de l'étanchéité du bâti améliore l'efficacité de la ventilation en permettant de retrouver les flux et transferts d'air prévus à la conception.**

Ce point étant acquis il reste que la définition de système de référence s'appuyant sur un indice synthétique unique n'a pas été atteint : il paraît clair aujourd'hui que nous ne disposons pas encore de données suffisamment fiables sur les émissions de polluants des matériaux et équipements qui permettrait d'avancer dans cette voie.

Des études réalisées dans des conditions reproductibles et représentatives sont nécessaires, la diffusion de leurs résultats doit se substituer aux sources bibliographiques existantes (ou en valider certaines si la qualité le permet).

Le comportement des occupants et l'utilisation de sources polluantes socialement répandues (tabac, encens, produits masquant, ...) peut rendre inopérant le meilleur des systèmes, car l'impact sur la QAI qui en résulte est si fort que les hiérarchies disparaissent. Il faudra à nouveau s'interroger sur la pertinence d'un système de référence, même si on dispose de données fiables d'émission.