

5725

FAUCONNIER Roland *, TAHON Christophe *, PERRAY Eric **

* Fédération Nationale du Bâtiment, France

** Gaz de France, France

MOTS CLES

Modélisation - Transferts d'air - Transferts de polluants - Qualité d'air

RESUME

Dans le cadre de leur réflexion sur la qualité des ambiances intérieures, la Direction de la Recherche de la Fédération Nationale du Bâtiment et la DETN du Gaz de France ont mis au point des codes de simulation du comportement aérohygrothermique des bâtiments en les enrichissant de modules d'évolution de polluants.

Les échanges internes de polluants (convection, gravité et diffusion), les taux d'émission (activité humaine, absorption-désorption dans les matériaux, fonctionnement d'équipements), la pollution extérieure et les réactions chimiques et photochimiques ont été pris en compte.

La comparaison des temps d'exposition des habitants (suivant des scénarios d'occupation) à des expositions de référence et des seuils critiques nous a conduits à définir un indice de qualité de l'air (IQA). Cet indice permet d'apprécier l'efficacité dans un environnement donné, de divers systèmes dépolluants, notamment la ventilation.

Le couplage numérique du calcul des évolutions de polluant à un modèle aérohygrothermique (transferts de chaleur, d'air et d'humidité) permet de caractériser la qualité de l'ambiance intérieure à partir d'indices de confort thermique, de qualité de l'air et de la mise en évidence des condensations. Le logiciel utilisé est le logiciel BILGA.

INDOOR SPACE QUALITY AND AIR QUALITY - MODELLING

FAUCONNIER Roland *, TAHON Christophe *, PERRAY Eric **

* Fédération Nationale du Bâtiment, France

** Gaz de France, France

KEY WORDS

Modelling - Air transfers - Pollutant transfers - Air quality

ABSTRACT

Considering the indoor air quality problem in the building in use, the Direction de la Recherche de la Fédération Nationale du Bâtiment has carried out, since 1981, a simulation model of the hygrothermal behaviour of multiroom buildings which takes into account the following points :

- radiant exchanges and convective exchanges are uncoupled,
- air exchanges between room take into account mechanical systems, stack effect and wind effect,
- conduction are calculated by implicate finite differences,
- energy balance is calculated by two balances : enthalpic balance and vapor mass balance.

This model has been validated with experiments in 1985.

In 1987, working with the Direction des Etudes et Techniques Nouvelles de Gaz de France this model has been completed by a module for computation of the pollutant contents which allows to estimate the human exposure to the main pollutants in the dwelling : CO₂, CO, NO, SO₂, HCHO, O₃ in order to estimate an indoor air quality indicator. Among the pollutant sources, the model takes into account the absorption/desorption in materials, human activity, equipment, exterior sources. The computation of pollutants takes into account the exchanges by convection, gravity and diffusion, chemical and photochemical phenomena.

Numerical results will show the influence of the main parameters acting on these exchanges. Comparisons between computations and experiment will be shown.

INTRODUCTION

La qualité de l'air dans l'habitat est un problème pris de en plus en plus au sérieux en France et, à l'étranger et pour lequel de nombreux chercheurs, tentent d'apporter des réponses. Deux aspects de ce problème sont généralement distingués : Santé et Sécurité. De manière simplifiée, on considère que la santé concerne les expositions à de faibles concentrations sur de longues périodes et que la sécurité met en jeu de fortes concentrations sur de courtes périodes.

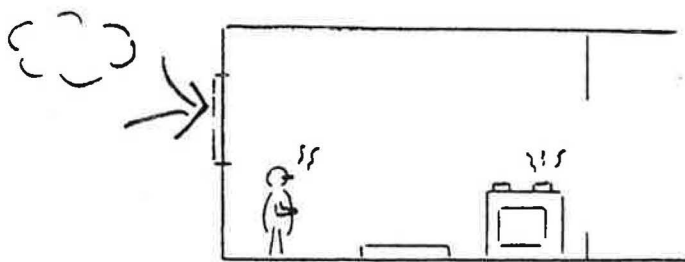
En France, les problèmes de sécurité ont fait l'objet d'un certain nombre d'études, de recommandations, voire de réglementations, en particulier pour l'utilisation des appareils de combustion. L'aspect santé, mis à part la réglementation sur la ventilation dans l'habitat, commence seulement à être pris en compte ; un certain nombre de mesures ont été et vont être effectuées. Parallèlement à ces mesures, il nous semblait important de tenter de modéliser la pollution interne. En effet, cette approche permet non seulement d'étudier de manière détaillée des cas critiques (aspect sécurité), mais également les expositions des habitants à certains polluants (aspect santé) et par étude de paramètres, de tester différents systèmes de ventilation, de chauffage, divers matériaux voir les comportements et style de vie des occupants.

Cette modélisation a donné lieu à un code de calcul couplé aux échanges aéro-hygro-thermiques : le logiciel BILGA. Le calcul de la pollution interne est couplé à la prise en compte des transferts thermiques (convectifs, radiatifs, (CLO et GLO), conductifs), des transferts aérauliques (calcul des échanges d'air par détermination du champ de pression lié au vent, au tirage thermique et aux effets des ventilateurs) et des transferts hygriques (Absorption, désorption et diffusion dans les matériaux et dans le mobilier).

Nous présentons ici les modalités de la modélisation numérique des évolutions de polluants, nos propositions pour indice de qualité de l'air, suivis de quelques résultats.

A. MODELISATION DE LA POLLUTION INTERNE

1. LES SOURCES DE POLLUTION



Les appareils

L'émission de polluant d'un appareil est noté $m(\text{APPAREILS})$ et :

- dépend de son mode de fonctionnement (continu, intermittent, cyclique),
- est une fonction (supposée linéaire) de sa puissance instantanée (W),
- est liée aux caractéristiques d'émission de l'appareil mesurées expérimentalement pour chaque polluant.

Exemple : Cuisinière 2 feux, âgée, 3 kW

Polluant	CO ₂	CO	NO ₂	NO	SO ₂	HCHO	O ₂
Emission (mg/kJ)	50000	120	10	15	0	0,6	-150000

Les matériaux

L'émission ou l'absorption d'un polluant P par un matériau M est pris en compte par une fonction du 1er ordre notée : $m(\text{MATERIAUX})$.

$$m(\text{MATERIAUX}) = F_T(M,P) \cdot F_{RH}(M,P) \cdot K(M,P) (C_p(M) - P_p) \cdot \text{SURF}(M)$$

avec :

$K(M,P)$: coefficient d'absorption du matériau M pour le polluant P (10^4m/s)

$C_p(M)$: concentration interne du polluant P dans le matériau M (mg/m^3)

$F_T(M,P)$: fonction de température du matériau M pour le polluant P

$F_{RH}(M,P)$: fonction d'humidité du matériau M pour le polluant P

$\text{SURF}(M)$: surface du matériau M dans la zone (m^2)

En s'appuyant sur les travaux de HOETJERS et MATTHEWS concernant le formaldéhyde, nous avons pris des fonctions de type cinétique :

- température :

$$F_T(M,P) = \exp(\text{COEFTP}(1/T - 1/T_0))$$

avec

COEFTP : coefficient de température déterminé expérimentalement,

T : température de la zone ($^{\circ}\text{K}$).

- humidité : $F_{RH}(M,P) = (PHYI/PHYI_0) \cdot COEFHR$
avec

COEFHR : coefficient d'humidité déterminé expérimentalement
PHYI₀ : humidité relative de la zone (%).

si COEFTP et COEFHR sont non nuls, le coefficient d'absorption du matériau doit avoir été mesuré à T₀, PHYI₀.

Cette modélisation est relativement simplifiée car elle ne tient pas compte de la diffusion du polluant à l'intérieur même du matériau. De plus, si les fonctions de température et d'humidité sont tout-à-fait en accord avec les mesures pour le formaldéhyde, leur validité n'a pas été prouvée pour d'autres polluants comme les NO_x.

Exemples	Coefficient d'absorption (10 ⁴ m/s)				Concentration Interne (mg/m ³)	
	NO ₂	NO	O ₃	SO ₂	HCHO	HCHO
Panneau de particules	0,20	0	2	0,40	4	0,2
Tapis	10	0	5,5	20	0,02	0,1

	Fonction de température (COEFTP)			Concentration Interne (COEFHR)		
	NO ₂	SO ₂	HCHO	NO ₂	SO ₂	HCHO
Panneau de particules	1670	0	-9480	2,50	0,36	0,40
Tapis	0	0	0	2,90	1,34	0

Les occupants

Les occupants dégagent du CO₂ et consomment l'oxygène de l'air au cours de la respiration, l'amplitude de celle-ci étant fonction de l'activité exprimé en MET par

CO₂ = 0,34 . MET (l/mm) si MET < 1,5

Le dégagement de CO₂ est par ailleurs lié à la consommation d'O₂ par
ECO₂ = 4/5 CO₂

Exemple : Individu debout au repos : activité 1 Met

CO₂ = 0,34 (l/mm)

ECO₂ = 0,27 (l/mm)

Dans notre programme informatique, l'activité de chaque individu est donnée heure par heure et pièce par pièce.

Les fumeurs

La contribution de la fumée de tabac à la pollution par les polluants primaires est prise en compte de manière très simplifiée pour CO₂, CO, NO₂ et HCHO, en supposant une émission constante et continue pendant 9 mn.

Exemple :

Polluant	CO ₂	CO	NO ₂	HCHO
Concent.(mg/cig)	350	60	1	2
Emission (g/s)	6,510 ⁻⁴	1,110 ⁻⁴	1,810 ⁻⁶	3,710 ⁻⁶

Heure par heure, on donne le nombre et le type de fumeur (2 ou 4 cig/h).

La pollution extérieure

La pollution extérieure, de part la ventilation, est considérée comme une source de pollution interne. Des profils de pollution extérieure sont données heure par heure pour chacun des sept polluants en tenant compte du type d'environnement (atmosphère naturelle, urbaine, semi-urbaine...). La pénétration des polluants de l'extérieur vers l'intérieur est liée à un facteur de pénétration F_p pour un polluant P qui permet de tenir compte de la réactivité de certains polluants lors du transfert extérieur-intérieur.

$$m(\text{EXTERIEUR}) = (1-F_p) \cdot Q_{\text{ext}} \cdot C_{\text{ext}}(P)$$

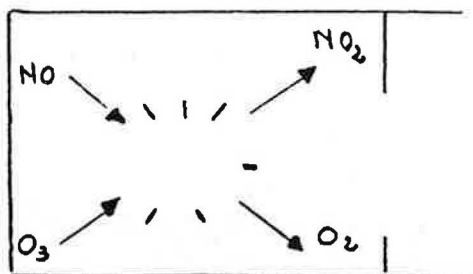
Q_{ext} : débit d'air neuf entrant (m³/s)

C_{ext}(P) : concentration extérieure du polluant P (g/m³)

Exemples :

	NO _x	O ₃	SO ₂
F _p	0,4	0,3	0,5

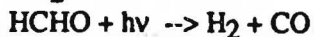
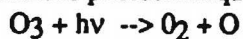
2. LES REACTIONS PHYSICOCHIMIQUES



Un modèle de réactivité chimique simplifié a été établi sur la base de modèles plus complexes élaborés pour la pollution atmosphérique.

Photochimie

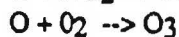
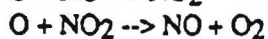
Trois réactions photochimiques ont été prises en compte :



Les constantes de réactivité de ces réactions sont calculées à chaque pas de temps à partir de l'intensité de rayonnement solaire pénétrant effectivement dans chacune des zones.

Réaction avec radicaux

Trois réactions importantes faisant intervenir les radicaux O ont été considérées :



On néglige les radicaux OH et H qui conduisent à une chimie beaucoup plus complexe.

Autres Réactions

Compte tenu des hypothèses, seule la réaction



a été intégrée au modèle.

Ces 7 réactions ont été choisies parmi un ensemble de plus de 50 équations chimiques ; nous n'avons retenu que les réactions dont les vitesses étaient importantes par rapport aux autres et en nous limitant aux 10 constituants mentionnés plus haut.

Le calcul du flux chimique est calculé pour chaque polluant et à chaque pas de temps, de la manière suivante :

$$m(\text{CHIMIE}) = V(\sum_i v_i - \sum_j v_j)$$

avec :

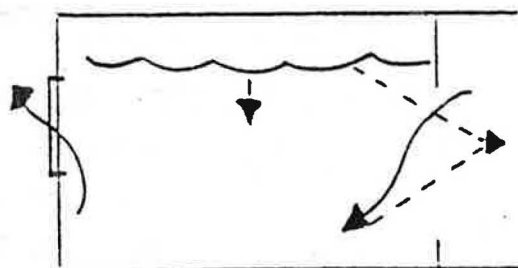
V : volume de la zone (m^3)

v_i : vitesse de production du polluant P par la réaction i ($g/m^3 s$)

v_j : vitesse de consommation du polluant P par la réaction j ($g/m^3 s$)

Ces vitesses sont fonction des concentrations des différents polluants dans la zone et sont du 1er ou 2ème ordre.

3. LES TRANSFERTS ENTRE ZONE



Trois modes de transferts de polluants sont possibles entre chacune des zones : convection, diffusion, gravité. Rappelons qu'une zone est caractérisée par des grandeurs physicochimiques homogènes : volume, température, vitesse de réaction chimique ... En général, on compte autant de zones que de pièces. Toutefois une même pièce peut être subdivisée en plusieurs zones pour étudier un phénomène particulier (stratification ...).

Convection

Les transferts de polluants sont liés aux transferts d'air pollué.

$$m(\text{CONVECTION}) = \sum_I Q_{VE}(I) \cdot \rho_p(I) - \sum_I Q_{VS}(I) \rho_p$$

avec :

- $Q_{VE}(I)$: débit d'air entrant de la zone I vers la zone considérée,
- $Q_{VS}(I)$: débit d'air sortant de la zone considérée vers la zone I
- $\rho_p(I)$: concentration en polluant P dans la zone I
- ρ_p : concentration en polluant P dans la zone considérée.

Diffusion

Les transferts sont liés aux différences de concentration entre zones. Nous avons retenu une formulation type loi de Fick :

$$m(\text{DIFFUSION}) = \sum_I D_p \cdot S(I) \cdot (\rho_p(I) - \rho_p) \cdot 1/L(I)$$

- D_p : coefficient de diffusion du polluant P (m^2/s)
- $S(I)$: section de passage entre la zone I et la zone considérée (m^2)
- $L(I)$: longueur moyenne entre la zone I et la zone considérée (m)

Gravité

Les transferts sont liés aux effets de la gravité.

$$m(\text{GRAVITE}) = - \sum_{I_1} v_{gp} \cdot S(I_1) \cdot \rho_p + \sum_{I_2} v_{gp} \cdot S(I_2) \cdot \rho_p(I_2)$$

avec :

- I_1 : zones placées au-dessous de la zone considérée
- I_2 : zones placées au-dessus de la zone considérée,
- v_{gp} : vitesse de sédimentation du polluant P.

Nous avons pu démontrer que pour les polluants classiques, il n'est plus possible de négliger la diffusion dès que le taux de renouvellement d'air atteint 0,2 volume par heure.

4. EQUATION GENERALE

L'équation générale du bilan masse de N zones tient compte des sources de pollution évoquées plus haut, des réactions physicochimiques et intègre les trois modes de transfert entre zone. Pour une zone I :

$$1/\varepsilon(I) \cdot V(I) \cdot d\rho_p(I)/dt = m(\text{APPAREILS}) + m(\text{MATERIAUX}) + m(\text{OCCUPANTS}) \\ + m(\text{EXTERIEUR}) + m(\text{CHIMIE}) \\ + m(\text{CONVECTION}) + m(\text{DIFFUSION}) + m(\text{GRAVITE})$$

$\epsilon(T)$ est l'efficacité d'évacuation de polluant définie par SKARET et SANDBERG. Elle permet de tenir compte des inhomogénéités de concentration dans une zone. Si le mélange air-polluant est parfait dans la zone, on considère : $\epsilon(T)=1$.

Cette équation est discrétisée par un schéma aux différences finies qu'on peut choisir explicite, implicite ou de Crank-Nickolson. A chaque pas de temps et pour chacun des polluants, le système est résolu, pour chaque zone et on détermine ainsi les évolutions de concentration des différents polluants au cours du temps.

B. PROPOSITIONS POUR UN INDICE DE QUALITE DE L'AIR

1. BUT

L'étude de la qualité de l'air dans l'habitat est à mettre en parallèle avec l'étude du confort thermique. En effet, dans les deux cas, on peut faire les observations suivantes :

- l'occupant est au coeur des préoccupations,
- le suivi des paramètres (température, vitesse d'air, ... ou concentration de polluant) n'est pas suffisant pour caractériser l'effet ressenti par l'occupant,
- étant donné l'extrême densité des occupants, seuls des indices basés sur des études statistiques peuvent avoir un sens.

Le but de ces indices est donc d'exprimer les effets de l'ambiance sur les occupants du logement à partir d'un certain nombre de paramètres physiques. Pour l'indice de confort thermique, développé par P.O. FANGER, on détermine la sensation de confort ou de gêne thermique ressentie par l'occupant. De même pour l'indice de qualité de l'air, on cherchera à déterminer les effets de la pollution (ressentis ou non) sur les occupants.

2. CALCUL DES EXPOSITIONS

Sans entrer dans les détails, nous considérerons qu'un individu est exposé au polluant P si cet individu est en contact avec un volume contenant ce polluant. On définit en général des expositions intégrées sur un temps donné (E).

$$E = \int_0^t C_p(t) dt$$

$C_p(t)$ étant l'évolution de la concentration du polluant P au cours du temps.

L'exposition standard permet de faciliter les comparaisons avec des valeurs standards internationales données pour des périodes t_s .

$$E_s = \int_0^{t_s} C_p(t) dt$$

On considère que la valeur standard C_s est dépassée si $E_s > C_s$.

Les fonctions $C(t)$ pour un polluant P sont disponibles en général sur des périodes T supérieures à t_s . Pour vérifier que la valeur standard n'est jamais dépassée sur T , il faut que :

$$V \int_{k\Delta t}^{k\Delta t + t_s} C_p(t) dt > C_s$$

avec $k = 0, 1, 2, \dots$

et Δt des fractions de t_s $0, t_s/2, t_s/4, \dots$ introduisant un décalage pour le début du calcul des expositions.

3 - EXTRAPOLATION DES VALEURS STANDARDS

On dispose en général de deux types de valeurs standard pour un polluant donné.

VRL : Valeur à Risques Limités

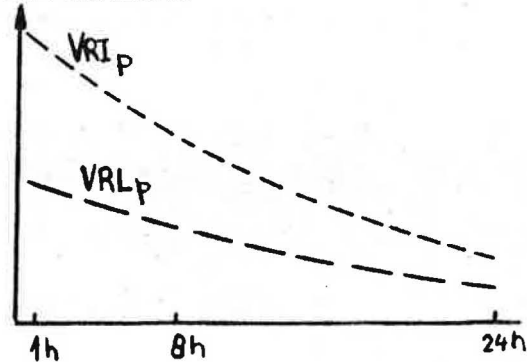
Pour des expositions inférieures à VRL, les risques pour la santé des individus sont limités, voire nuls.

VRI : Valeur à Risques Importants

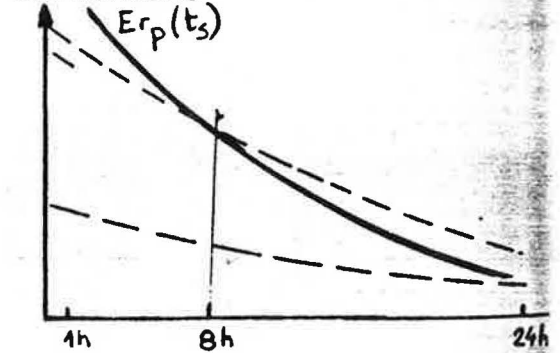
Pour des expositions supérieures à VRI, les risques pour la santé des individus sont importants, en général irréversibles.

Ces deux types de valeurs sont donc des valeurs d'exposition pour une période donnée (1 h, 8 h ou 24 h). Or, si les occupants d'un logement sont présents 1 h, ils peuvent l'être 3 h, 4 h, etc... sans pour autant atteindre 24 h. On est donc obligé "d'extrapoler" les valeurs standards sur 1 h, 8 h ou 24 h. Cette extrapolation est parfois délicate pour certains polluants, faute de données suffisantes.

EXPOSITIONS



EXPOSITIONS



$Er_P(t_s)$ est la courbe des expositions réelles calculées dans le logement pour plusieurs temps t_s :
 $Er_P(t_s) = Oc \cdot E_s$ avec :

$Oc = 1$ si les occupants sont présents,
 $Oc = 0$ si les occupants sont absents.

Ces extrapolations peuvent être discutées et modifiées ; nous espérons rencontrer des médecins, épidémiologistes et toxicologues pour présenter ces problèmes et tenter d'y apporter des réponses.

4 - DEFINITION D'UN INDICE DE QUALITE DE L'AIR IQA

L'indice de qualité de l'air IQA_p est un indicateur de l'intensité du risque lié au polluant P. Il est défini à partir des valeurs VRI et VRL par :

$$IQA_p(t_s) = \frac{Er_p(t_s) - VRL_p(t_s)}{VRI_p(t_s) - VRL_p(t_s)}$$

$$\text{et } IQA_p = \text{MAX}/T(IQA_p(t_s))$$

On obtient pour IQA_p la valeur maximum de $IQA_p(t_s)$ détectée sur la période T.

Si $IQA_p > 1$ le risque du au polluant P est inacceptable.

Si $IQA_p < 0$ le polluant P n'a aucun effet sur les occupants.

Pour l'ensemble du logement $IQA_p = \text{MAX}/i(IQA_p(i))$ avec $IQA_p(i)$ l'indice de qualité de l'air dans la pièce i.

Pour aller plus loin et définir un indice global de qualité de l'air pour l'ensemble des polluants, il faudrait prendre en compte les effets synergétiques des polluants (par exemple NO_x et O_3). Là encore, nous comptons sur la collaboration avec des équipes médicales pour tenter de répondre à ces questions.

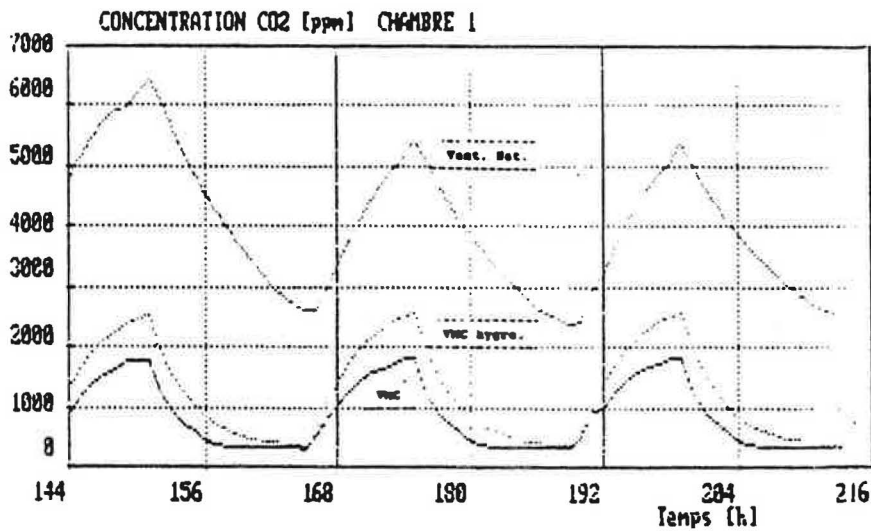
Il faut noter que l'indice préalablement défini caractérise le bâtiment mais n'est pas forcément représentatif de l'exposition réelle des occupants. En effet, un occupant peut séjourner 3 h au total dans son logement, 1 h dans une pièce, 2 h dans une autre ; on calculera son exposition sur 1 h et 2 h mais pas l'exposition cumulée sera 3 h.

C - RESULTATS.

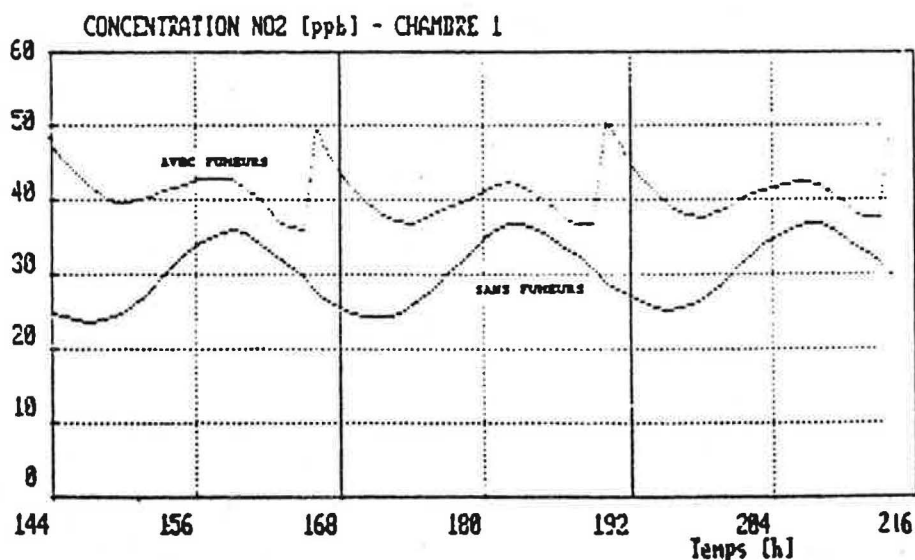
Les courbes ci-dessous présentent les résultats de simulation sur 3 jours dans un logements type pavillon individuel F3, structure classique isolée, occupé par une famille de 4 personnes.

1. POLLUTION LIEE AUX OCCUPANTS.

La figure ci-dessous montre l'évolution de la concentration en CO_2 dans une chambre occupée la nuit par 2 personnes sur une période de 3 jours. Trois systèmes de ventilation ont été étudiés : ventilation naturelle, ventilation mécanique et ventilation mécanique régulée sur l'humidité.



Si un individu de cette chambre fume deux cigarettes le soir, une augmentation de la teneur en CO, NO₂, CO₂ et HCHO est mise en évidence dans le cas de la ventilation naturelle.



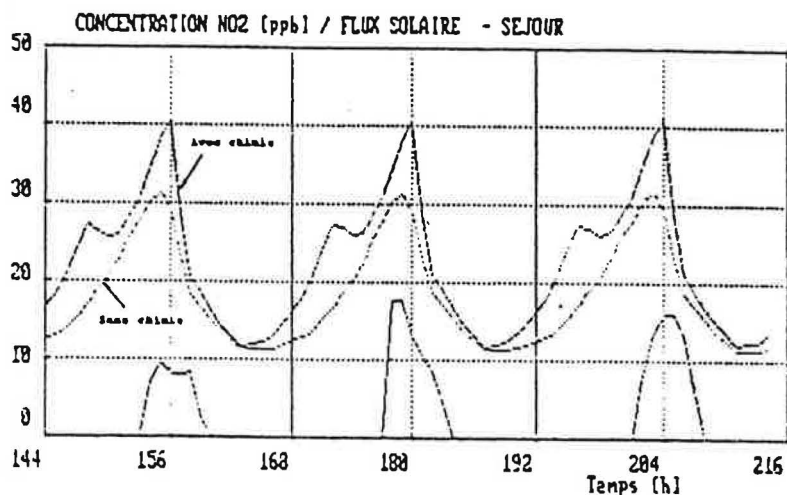
INDICES DE QUALITE DE L'AIR POUR CO₂.

IQA	Vent. Nat.	V.M.C.	VMC Hygro
Non fumeurs	0,90	0	0,07
Fumeurs	1,10	0	0,07

Compte tenu de la manière dont nous modélisons la fumée de tabac, nous pouvons dire que la contribution de la fumée de tabac par CO₂, CO, NO₂ et HCHO, n'est sensible que pour la ventilation naturelle et en particulier quand les fumeurs sont dans les chambres. Toutefois, certaines études ayant montré que le CO était un bon marqueur de la fumée de tabac en l'absence de sources, on peut supposer que la gêne ressentie par les occupants se trouvera augmentée.

2 - PHENOMENES PHYSICO-CIMIQUES

Deux simulations ont été effectuées avec ou sans prise en compte de réactions chimiques. La figure ci-dessous montre les différences obtenues dans le cas de NO₂.



Les variations observées peuvent s'expliquer par quelques réactions clés.

En l'absence de flux solaire, la réaction :



est prépondérante - O₃ n'est plus produit par voie photochimique et est donc rapidement consommé.

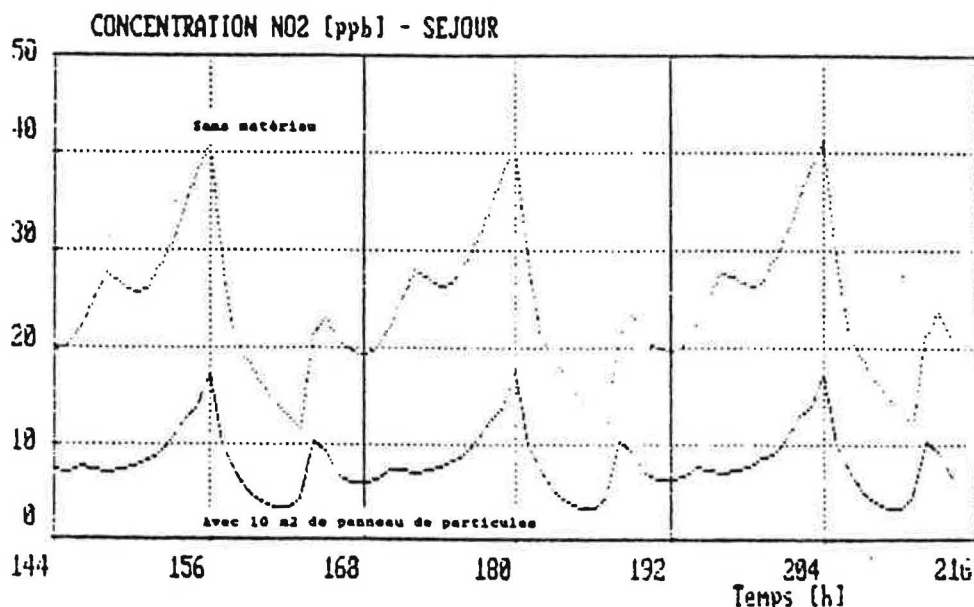
En présence de flux, des espèces radicalaires sont produites et les réactions suivantes sont prises en compte :



Tant que NO n'est pas entièrement consommé, la réaction (1) est prépondérante et produit plus de NO₂ que les réactions (2) et (3) n'en consomment. D'où le pic de NO₂. Ensuite la réaction (1) s'arrête : un nouvel équilibre s'établit entre la réaction (2), (3) et (4) qui conduit à une diminution rapide de NO₂.

3 - CONTRIBUTION DES MATERIAUX.

La figure ci-dessous montre l'importance des phénomènes d'absorption-désorption dans les matériaux.



CONCLUSION

Les propositions faites concernant la définition d'un indice de qualité de l'air pour l'habitat demandent à être discutées et approfondies au sein d'équipes pluridisciplinaires composées entre autres de toxicologues et d'épidémiologistes. L'extension de cet indice pour chaque polluant et pour chaque pièce à l'ensemble du logement en dépend.

L'indice de Qualité de l'Air présente l'intérêt majeur de caractériser une ambiance vis à vis d'un polluant en terme d'effets sur la santé des occupants qui s'y trouvent. Cette approche relativement objective permet de comparer différents systèmes entre eux, de tester des cas critiques, éventuellement de déterminer les solutions les mieux adaptées. En outre, cet indice tient compte de la présence des occupants et est intimement lié à l'environnement interne et externe.

Nos études concernant la qualité de l'air s'inscrivent dans une approche globale de la qualité des ambiances intérieures. Exprimer la qualité d'un logement en terme de consommations énergétiques et de confort thermique est intéressante ; une approche en terme de santé permet d'aller plus loin. On peut envisager, à terme, des critères olfactifs, acoustiques ... le but étant de privilégier la qualité de la vie dans l'habitat, ce qui correspond par ailleurs à une demande très forte de la part de l'opinion.