

Un modèle couplé de transfert de masse et de chaleur pour évaluer l'impact des choix de conception sur la qualité de l'air intérieur

Alice Micolier¹

¹ University of Bordeaux, Engineering and Mechanical Institute (I2M)

RÉSUMÉ. Les nouvelles normes de conception et de rénovation des bâtiments tendent à accroître le confinement des espaces intérieurs dans lesquels une grande variété de produits chimiques sont libérés par les matériaux et exposent les occupants à de multiples risques pour la santé. Les propriétés physico-chimiques des produits chimiques contenus dans les matériaux de construction sont dépendants de la température. Par conséquent, il est urgent de traiter le devenir des produits chimiques conjointement avec les transferts de chaleur afin d'évaluer de façon cohérente l'impact des premiers choix de conception sur l'exposition humaine ainsi que sur la consommation énergétique. Nous proposons un modèle dynamique mono-zone couplant les transferts de masse et de chaleur dont la robustesse est validée. L'influence de la température sur la dynamique des émissions d'un composé organique volatil et semi-volatile est quantifiée. Trois systèmes clés de la conception (isolation, ventilation et chauffage) sont évalués en terme de consommation énergétique et d'exposition humaine. Cette étude met en avant l'importance de la prise en compte de la température dans la compréhension des mécanismes de transferts de masse et de l'interaction matériaux-polluants.

ABSTRACT. New building design and renovation standards tend to increase the confinement of indoor spaces in which a wide variety of chemicals are released by construction materials and expose occupants to multiple hazards. The physico-chemical properties of the chemicals contained in building materials are temperature dependent. Therefore, it is necessary to treat the fate of chemicals together with heat transfers in order to consistently evaluate the impact of early design choices on human exposure as well as on energy consumption. We propose a dynamic single-zone model coupling mass and heat transfers whose robustness is validated. The influence of temperature on the emission dynamics of a volatile and semi-volatile organic compound is quantified. Three key design systems (insulation, ventilation and heating) are evaluated in terms of energy consumption and human exposure. This study highlights the importance of taking the temperature into account to better understand mass transfer mechanisms and the materials-pollutants interaction.

MOTS-CLÉS : qualité de l'air intérieure, transfert de masse, transfert de chaleur, conception amont de bâtiment

KEYWORDS : indoor air quality, mass transfer, heat transfer, early design choices

1. Introduction

Le secteur de la construction est un contributeur majeur en termes de consommation de ressources et d'impacts environnementaux. Pour répondre à cela, des efforts considérables ont été et sont encore déployés pour promouvoir les bâtiments économes en énergie [EUR 18]. Cela a conduit à des normes de conception et de rénovation tendant à accroître l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment. Les bâtiments à basse consommation énergétique sont désormais des espaces particulièrement confinés dans lesquels une grande variété de produits chimiques, issus des matériaux et peintures utilisés, sont libérés. Cela expose les occupants à de multiples risques pour la santé par le biais de diverses voies d'exposition [BEK 13]. La pollution intérieure est devenue un problème de santé publique majeur à l'échelle mondiale dans la mesure où nous passons en moyenne 80% de notre temps dans des espaces clos.

Par conséquent, les pratiques de conception durable doivent intégrer de manière systématique et cohérente le compromis entre consommation énergétique et exposition humaine. L'impact des premiers choix de conception sur le comportement thermique des bâtiments est désormais bien appréhendé. Cependant, des efforts importants doivent être déployés pour guider la maîtrise d'œuvre vers des bâtiments assurant une bonne qualité de l'air intérieur. Apprendre à concevoir des bâtiments sains et économes en énergie est l'un des défis de demain.

L'objectif principal du travail présenté dans cet article est d'évaluer l'impact des choix de conception de bâtiments, en phase amont, sur l'exposition humaine et la consommation énergétique en tenant compte de l'interaction entre les transferts de chaleur et les transferts de masse des polluants.

2. Méthodologie

La pollution de l'air intérieur provient principalement des produits chimiques libérés par les matériaux de construction au sein de l'habitation [Wes 09]. Quatre mécanismes principaux régissent le devenir des produits chimiques : l'émission depuis les matériaux de construction, la sorption en phase gazeuse sur les puits intérieurs, l'évacuation dans l'air extérieur et la réaction avec les oxydants. L'émission des produits chimiques depuis les matériaux de construction sont estimés à l'aide de coefficients de diffusion et de partage spécifiques à des combinaisons produit-matériau et dépendants de la température. Le coefficient de transfert de masse par convection, qui régit l'échange entre la couche limite immédiatement adjacente à la surface du matériau et la phase gazeuse, dépend de la température et le taux de renouvellement d'air.

Dans les environnements intérieurs, la plage de variation de la température n'est pas négligeable : elle varie en moyenne de 19°C en hiver à 26 ° C en été, tandis que les températures de surface peuvent subir une variation de 10 ° C au cours de la journée en fonction du rayonnement solaire. De nombreuses études expérimentales ont montré que la concentration intérieure en polluant dépend de la température ([GAS 14], [MAC 12]) et qu'une augmentation de la température de 25 à 35 ° C peut augmenter la concentration de phtalates en phase gazeuse de plus d'un facteur 10 [LIA 14]. La température intérieure quant à elle dépend des échanges avec l'extérieur et les transferts de chaleur sont déterminés par le taux de renouvellement d'air et les propriétés thermiques des matériaux. Étant donné que les émissions de polluant et leur devenir à l'intérieur sont liés à la température, il est nécessaire de prendre en compte l'effet combiné des facteurs environnementaux dans les environnements intérieurs afin de modéliser la dynamique des polluants à l'intérieur. [WEI 19] ont développé un modèle d'émission des composés organiques semi-volatiles (COSVs) dans lequel la température influence les paramètres de transfert de masse. Cependant, la température est directement introduite dans le modèle à partir de données expérimentales.

Divers choix de conception, comme le système de ventilation par exemple, ont une incidence directe sur les performances thermiques et la qualité de l'air intérieur du bâtiment. Cependant, certains choix de conception, tels que le système de chauffage ou l'isolation, sont susceptibles d'influencer la qualité de l'air *via* la température, mais leur considération a toujours été restreinte à la performance énergétique. Par conséquent, il est urgent de traiter conjointement le devenir des polluants et les transferts de chaleur dans les environnements intérieurs afin d'évaluer de manière cohérente l'impact des choix de conception sur l'exposition des occupants. Cette approche nécessite de modéliser la température à la surface et à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment. Des modèles de transfert de chaleur dynamiques ont été développés au cours des 50 dernières années (voir [HAR 16] pour une revue complète de la littérature scientifique). [YAN 08] ont proposé un outil permettant de prédire la température intérieure et la concentration en composé organique volatiles (COVs) de manière simultanée mais non couplée : dans leur modèle, les mécanismes d'émission et de transport des COVs ne sont pas dépendants à la température. Pour évaluer systématiquement et de manière cohérente l'impact des choix en phase amont de conception sur la qualité de l'air intérieur, un modèle doit traiter les transferts de chaleur et de masse de polluants conjointement et dynamiquement.

Pour y parvenir, nous traiterons les objectifs spécifiques suivants : (a) élaborer un modèle numérique décrivant les transferts de chaleur et de masse de polluants depuis l'enveloppe du bâtiment jusqu'à l'air intérieur, (b) caractériser l'effet de la température sur la dynamique des émissions de polluants des matériaux de construction et (c) analyser l'impact de différentes solutions de conception sur la consommation énergétique et l'exposition des occupants.

3. Modèle

3.1. Modélisation du transfert de masse et de chaleur

Modélisation de la conservation de la chaleur. Pour réduire la complexité du modèle mathématique, les hypothèses suivantes sont prises en compte : (1) matériaux homogènes et résistance de contact négligeable entre deux couches de matériaux, (2) modèle d'écoulement uniformément réparti le long de toute section transversale des éléments fonctionnels, (3) le bâtiment est en contact avec une seule zone thermique (extérieure) représentée par un seul nœud. Dans la mesure où nous nous intéressons à la dynamique d'émission des polluants et non à la valeur de la concentration intérieure, les erreurs de calcul induites par les hypothèses de calcul ne sont pas

estimées. Pour simuler le transfert de chaleur dans des environnements intérieurs, le modèle prend en compte les mécanismes suivants : (1) conduction dans l'enveloppe du bâtiment, (2) convection de la surface solide des matériaux vers la phase gazeuse intérieure et (3) échanges radiatifs intérieurs.

Les coefficients de convection intérieure sont calculés à chaque pas de temps en fonction de la dimension caractéristique de la surface et de la différence de température entre la surface et l'air, sur la base des équations empiriques développées par [Kha 90]. Le coefficient de transfert de chaleur par convection extérieure h_{vo} (m/h) est calculé à chaque pas de temps en fonction de la vitesse du vent v_{wind} (m/h).

Le rayonnement solaire global sur la surface verticale de la fenêtre est évalué à chaque pas de temps grâce à l'équation du temps. Le facteur solaire du vitrage définit la fraction du rayonnement solaire qui pénètre dans le bâtiment à travers la fenêtre. La fraction des rayons solaires à ondes courtes traversant les fenêtres est supposée être d'abord transmise à la surface du sol. Une fraction des radiations incidentes est absorbée par le sol, l'autre fraction des radiations solaires à ondes courtes est réfléchiée et réémise en tant que rayonnement à ondes longues sur les autres surfaces de l'enveloppe du bâtiment en fonction du coefficient d'émissivité thermique ε_{clo} (-) du matériau de revêtement du sol. Les transferts de chaleur radiatifs entre les surfaces sont dus à la température des surfaces. Les coefficients de transfert de chaleur radiative $h_{r,s}$ (W/m²/K) sont calculés à chaque pas de temps pour chaque surface.

La face inférieure du revêtement de sol est considérée en contact avec l'air extérieur (c'est-à-dire un vide sanitaire hautement ventilé). La perméabilité de l'enveloppe du bâtiment est supposée nulle et une seule ouverture de ventilation permet l'entrée d'air frais. Par conséquent, l'équilibre d'enthalpie sensible du nœud d'air intérieur peut être exprimé comme suit :

$$\rho_a c_a V \frac{dT_{in}(t)}{dt} = - \sum_{j=1}^6 h_{vi}(t) S_j (T_{in}(t) - T_{si,j}(t)) - Q \rho_a c_a (T_{in}(t) - T_{out}(t)) + P_{heating}(t) \quad [1]$$

Modélisation des transferts de masse de polluants. Les hypothèses suivantes sont formulées : (1) toutes les surfaces sont poreuses, c'est-à-dire que la diffusion dans les puits intérieurs n'est pas négligée, (2) parfaite efficacité du transport des produits chimiques entre l'intérieur et l'extérieur, c'est-à-dire sans pénétration ni infiltration, (3) l'air intérieur est parfaitement mélangé, et (4) les sources intérieures sont les surfaces de l'enveloppe du bâtiment et émettent continuellement. Pour prédire la concentration en polluants en intérieur, les mécanismes suivants sont pris en compte dans le modèle : (1) émission de polluants des surfaces intérieures vers la phase gazeuse ; (2) transfert de masse entre la phase gazeuse, les particules en suspension dans l'air, la poussière et les surfaces des puits ; (3) élimination des polluants présents dans la phase gazeuse vers les environnements extérieurs et vers le corps humain par inhalation et absorption cutanée gazeuse et (4) élimination des produits chimiques par contact direct de la peau et absorption à la surface des matériaux au cours des activités mains-à-bouche.

La diffusion d'un produit chimique à l'intérieur d'un matériau est un phénomène non stationnaire unidimensionnel qui suit la loi de Fick. Le coefficient de diffusion D_m (m²/s), qui décrit le transport d'une molécule à travers un matériau, et le coefficient de partage matériau-air K_{ma} (-) qui est le rapport de la concentration du polluant à la surface du matériau à la concentration dans la phase gazeuse à l'équilibre, sont spécifiques pour une combinaison polluant-matériau et dépendent de la température. Pour être en mesure d'évaluer de nombreuses solutions de conception différentes, y compris différents matériaux, les coefficients de diffusion et de partage doivent être estimés (1) à partir des propriétés physico-chimiques connues des polluants et (2) pour une large gamme de matériaux. Parmi les méthodes de corrélation disponibles, [HUA 17] et [HUA 18] ont développé une relation quantitative propriété-propriété pour prédire les coefficients de diffusion et une relation quantitative structure-propriété pour estimer respectivement le coefficient de partage matériau-air, en tenant compte des deux conditions mentionnées ci-dessus et en fonction de la température (Eq. [2] et Eq. [3]).

$$D_m(x, t) = 10^{\frac{\tau - 3486}{T(x,t)} + 6.39 - 2.49 \cdot \log_{10} MW + b} \quad [2]$$

$$K_{ma}(x, t) = 10^{-0.739 + 0.714 \cdot \log K_{oa} + 0.996 \cdot \frac{\Delta H_{ma}}{2.303R} \left(\frac{1}{T(x,t)} - \frac{1}{298.15} \right) + \beta} \quad [3]$$

Une fois libérés dans le milieu gazeux, les produits chimiques peuvent se répartir entre plusieurs compartiments que sont la phase gazeuse, les surfaces de l'enveloppe du bâtiment et les surfaces des occupants eux-mêmes. Trois voies d'élimination des produits chimiques présents en phase gazeuse sont considérées : (1) ventilation, (2) inhalation et (3) absorption cutanée gazeuse. De plus, les produits chimiques à la surface des matériaux peuvent être éliminés par deux voies : (1) contact direct avec la surface de la peau et (2) ingestion par des activités main-bouche des produits chimiques transférés en poussière. Le coefficient de transfert de masse

convectif h_m à la couche limite de chaque élément fonctionnel est calculé grâce à un modèle de couche limite décrivant l'écoulement sur un plan plat selon [HOL 12].

$$h_{m,j}(x,t) = \frac{D_a(x,t)}{l} * 0.664 \left(\frac{\mu_a(x,t)}{\rho_a D_a(x,t)} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_a v_a l}{\mu_a(x,t)} \right)^{1/2} \quad [4]$$

La vitesse de l'air intérieur v_a (m/s) est corrélée au taux de renouvellement d'air ACH (vol/h) à partir de l'équation empirique de [Liu 15].

$$v_a = 0.15 ACH^{0.15} \quad [5]$$

Le bilan de conservation massique d'une espèce dans un volume de contrôle déterminé s'exprime à travers l'équation différentielle suivante :

$$V_{building} \frac{dC_{in,g}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^6 S_i h_{m,i}(t) \left(\frac{C_{s,i}(t)}{K_{m,a_i}(t)} - C_{in,g}(t) \right) - \sum_{j=1}^6 S_j h_{m,j}(t) \left(\frac{C_{s,j}(t)}{K_{m,a_j}(t)} - C_{in,g}(t) \right) - Q (C_{in,g}(t) - C_{out}(t)) - (N_{ch} inhR_{ch,time,ch} + N_{ad} inhR_{ad,time,ad}) - K_{p,gas}(t) (N_{ch} A_{skin,gas,ch,time,ch} + N_{ad} A_{skin,gas,ad,time,ad}) \quad [6]$$

. Pour évaluer l'exposition des occupants du bâtiment lors de la phase d'utilisation, on calcule la fraction de prise de produit (PiF) qui représente le rapport entre la masse de produit chimique absorbée par les occupants et la masse de produit chimique initialement présente dans le produit [JOL 15].

3.2. Implémentation du modèle

Discrétisation spatiale et temporelle. La méthode des éléments finis (FEM) est utilisée pour subdiviser l'ensemble du domaine en parties appelées éléments finis. Chaque élément fini est constitué de deux nœuds, un pour la température, un pour la concentration. Un système de N équations linéaires est établi qui est résolu à chaque pas de temps :

$$\dot{y} = A_s y + B_s \quad [7]$$

Avec y un vecteur colonne avec N/2 concentrations et N/2 températures, A_s une matrice NxN et B_s un vecteur colonne avec N entrées. A_s est fonction des paramètres de conception du bâtiment, des coefficients physico-chimiques des polluants, des paramètres de convection et de rayonnement. B_s représente l'influence de facteurs externes et est fonction des données environnementales (température extérieure, vitesse du vent et rayonnement solaire global).

Pour réduire le nombre d'équations différentielles nécessaires à l'obtention de la précision souhaitée, i.e. le nombre de nœuds, les couches doivent être plus minces à mesure que le gradient de concentration et de température s'accroît. Comme les transferts de masse et de chaleur sont plus importants aux couches limites de chaque matériau, l'épaisseur des couches extérieures doit être plus mince que celle des couches centrales du matériau. Comme le propose [GUO 13], l'épaisseur de ces couches est fixée de manière non homogène.

Validation du modèle. Le modèle numérique est implémenté sur le logiciel Matlab®. Le solveur ode15s est choisi en raison de la rigidité du système. Le modèle est validé par une validation interne de chaque sous-modèle, c'est-à-dire le modèle thermique et le modèle chimique. Nous confrontons la fiabilité de nos résultats de simulation avec la solution analytique proposée par [DEN 04] en utilisant l'erreur quadratique moyenne quadratique (EQM). La moyenne du EQM calculée pour différents paramétrages du modèle est présentée afin de s'assurer que la fiabilité de notre modèle n'est pas spécifique à une configuration de pièce ni aux propriétés chimiques intrinsèques d'un polluant.

3.3. Caractérisation de l'effet de la température

Systèmes de conception étudiés. Notre objectif est d'explorer trois aspects de la conception des bâtiments résidentiels : (1) système de chauffage (chauffage au sol par rapport à un appareil de chauffage radiant classique), (2) système d'isolation (position du matériau isolant dans le mur) et (3) système de ventilation (système d'échangeur de chaleur au lieu de ventilation naturelle et débit de ventilation).

Cas d'étude. Le modèle est implémenté sur une habitation de 88,80m². Les matériaux de construction ont été choisis afin de fournir une masse thermique élevée à la structure. L'enveloppe du bâtiment est faite de béton lourd et d'isolant en laine de verre. Les quatre murs extérieurs ont la même composition. Les deux fenêtres orientées plein sud représentent 2,5% de la surface de la façade. Les fenêtres à cadre en aluminium sont à double vitrage avec un coefficient de gain solaire de 0,70 et une transmission lumineuse visuelle de 0,78. Les données environnementales (température de l'air extérieur, vitesse du vent, radiations solaire) proviennent des mesures de Météo France pour la ville de Bordeaux en 2016.

Plan d'expérience. Un plan d'expérience factoriel (PEF) est utilisé pour explorer les relations entrées/sorties dans la mesure où plus d'un facteur d'entrée est soupçonné d'influencer les résultats [MON 07]. Chaque système de conception est un facteur du PEF et comporte deux niveaux, de sorte que le plan factoriel est de 2^4 , avec 16 conditions expérimentales différentes. Le PEF est réalisé pour le l'Ethylbenzène et pour le DEHP. L'effet principale de la solution de conception X (isolation extérieure, échangeur de chaleur, chauffage au sol) sur la sortie Y (PiF et consommation énergétique) est évalué ainsi :

$$\text{Effet principal}(X)\% = 100 \frac{Y_{\text{avec}(X)} - Y_{\text{sans}(X)}}{Y_{\text{sans}(X)}} \quad [8]$$

4. Résultats et discussion

4.1. Validation du modèle

La concentration en phase gazeuse obtenue avec notre modèle est comparée avec la solution analytique proposée par [DEN 04] pour l'hexanal et l'alpha-pinène en Figure 1 (a) et (b) respectivement. Le EQM inférieur à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les deux cas témoigne de la fiabilité du modèle. De même, le RSME inférieur à 0.5°C en hiver (du 1^{er} octobre 2015 au 31 mars 2016) comme en été (du 1^{er} avril au 30 septembre 2016) témoigne du bon accord entre les valeurs simulées et le logiciel de simulation dynamique Graitec® pour une gamme de température extérieures variant de 0°C à 30°C . L'hiver n'est pas représentatif du comportement du bâtiment dans la mesure où la puissance de chauffage est régulée afin de maintenir une température intérieure à 20°C ; en revanche, le comportement thermique du bâtiment en été montre un niveau satisfaisant.

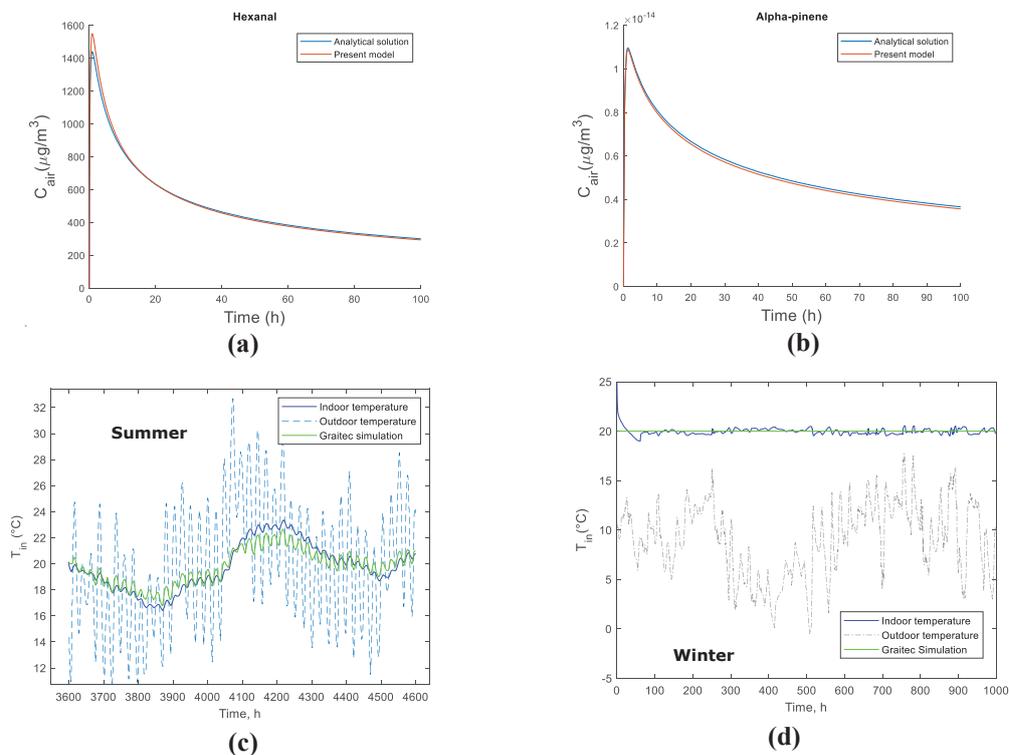


Figure 1. (a) et (b) Comparaison de la concentration intérieure obtenue avec notre modèle et avec la solution analytique pour l'Hexanal et l'Alpha-pinène respectivement ; (c) et (d) Comparaison de la température de l'air intérieur simulée avec notre modèle et avec le logiciel de thermique dynamique Graitec® pour la ville de Bordeaux en été et hiver respectivement

4.2. Caractérisation de l'impact de la température

Impact sur la variation au sein des matériaux. Les équations [2] et [3] permettent d'appréhender que la variation de D_m par rapport à sa valeur standard dépend du type de matériau, tandis que la variation de K_{ma} par rapport à sa valeur standard dépend uniquement de l'enthalpie de vaporisation du polluant. La variation de température par rapport à 298K a un impact important sur K_{ma} et D_m dans les plages de températures basses et élevées respectivement. Cela pose naturellement la question de savoir dans quelle mesure la température varie en fonction de l'épaisseur des matériaux de construction dans des conditions standards. La Figure 2 représente le

rapport entre les coefficients de diffusion et de partage dépendants de la température et leur valeur standard respective pour onze matériaux couramment utilisés dans les enveloppes de bâtiments. Comme la variation de D_m par rapport à sa valeur standard dépend du type de matériau, il existe une différence notable dans le rapport $D_m / D_{m, \text{std}}$ d'un matériau à l'autre: le rapport moyen est d'environ 0,2 pour les matériaux à base de ciment (béton, enduit) alors qu'il atteint 0,8 pour les panneaux de bois et le contreplaqué. En moyenne, D_m varie moins de sa valeur standard que K_{ma} .

Des valeurs élevées de $K_{ma} / K_{ma, \text{std}}$ peuvent être observées dans des matériaux où les températures sont particulièrement basses, c'est-à-dire des valeurs $T - T_{\text{std}}$ élevées. Ces matériaux sont en contact avec l'extérieur (par exemple, béton, enduit) ou en contact avec des matériaux ayant une conductivité thermique élevée (par exemple, isolation en polyuréthane, mousse de polystyrène). Comme mentionné précédemment, la variation du rapport $K_{ma} / K_{ma, \text{std}}$ dépend de l'enthalpie de vaporisation du polluant, et un calcul de $K_{ma} / K_{ma, \text{std}}$ pour différentes enthalpies montre que pour des enthalpies supérieures à 100kJ/mol, ce ratio peut atteindre plus de 30. La dispersion des valeurs $K_{ma} / K_{ma, \text{std}}$ pour ces matériaux reflète une variation substantielle dans le temps, en raison de la différence importante de l'ampleur des transferts de chaleur à travers les matériaux extérieurs de l'enveloppe du bâtiment entre les saisons estivales et hivernales.

Pour les matériaux directement en contact avec l'air intérieur (panneaux de gypse, revêtements de sol en vinyle, par exemple) ou situés après des matériaux à haute résistance thermique comme les chapes par exemple, les températures moyennes se situent autour de 20 ° C (différence de 5 ° C avec la valeur standard) et varient peu au cours de l'année car en hiver la température intérieure est fixée à 20 ° C et en été, l'inertie importante de ce type d'enveloppe de bâtiment empêche la température intérieure d'être trop élevée. Cependant, la dispersion des groupes de température pour les matériaux extérieurs révèle une importante variation de la température dans le temps.

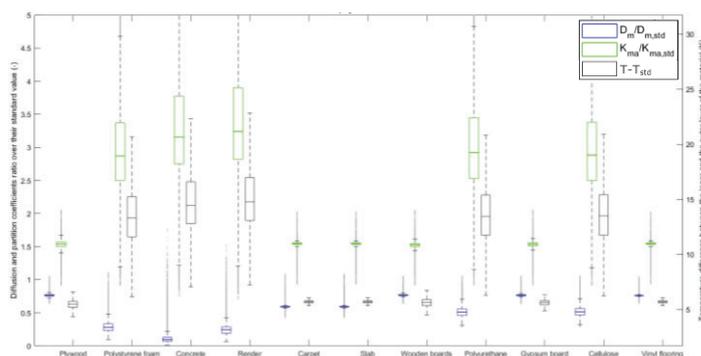


Figure 2. Variation des coefficients physicochimiques autour de leur valeur standard pour onze matériaux et pour une enthalpie de vaporisation de 50kJ/mol

Dynamique d'émission. La Figure 3 (a) et (b) montre les profils de concentration intérieure simulés pendant un mois d'hiver avec des paramètres physico-chimiques dépendants du temps ($C_{in}(t)$) et standards ($C_{in, \text{std}}$) pour l'éthylbenzène et le DEHP respectivement. La dynamique d'émission des deux polluants est plus lente pour $C_{in}(t)$ dans la mesure où la température intérieure et au sein des matériaux est inférieure à la température standard de 25°C. Lorsque la température diminue, h_m et D_m diminuent tandis que K_{ma} augmente. La diffusion au sein des matériaux est donc plus lente, la partition entre la phase solide et la phase gazeuse plus difficile, et la convection moins rapide.

L'éthylbenzène est un composé organique volatil (COV) dont l'émission depuis les matériaux de construction est principalement contrôlée par la diffusion intra-matériaux. En effet, il possède un faible D_m et K_{ma} , c'est-à-dire qu'une fois la surface du matériau atteinte, ce polluant est rejeté dans la phase gazeuse rapidement et sorbera peu sur les autres surfaces. Lorsque l'on considère la température ambiante qui est en été plus faible que la température standard, le K_{ma} des surfaces « puits » de la pièce augmente et l'étude de la balance massique de l'éthylbenzène dans les matériaux de l'enveloppe du bâtiment révèle que la sorption n'est alors plus négligeable. De forts débits de ventilation au moment de la livraison du bâtiment ne permettraient donc pas d'éliminer complètement les VOCs qui seront désorbés par les parois du bâtiment plus tardivement.

Le DEHP est quant à lui un semi-volatile organique (SVOC) dont le processus d'émission est dominé par les transferts de masse externes dans la mesure où il possède un fort K_{ma} (sorption facile) et un fort D_m (diffusion rapide). Lorsque la température diminue, la diffusion au sein du matériau sera moins rapide et la sorption sur les

autres surfaces de la pièce favorisée, ce qui explique une concentration intérieure 15% plus faible en moyenne sur une période d'un mois. La considération des transferts de chaleur permet de quantifier que ce SVOC est donc libéré dans l'air intérieur en plus faible quantité et la simulation sur la durée de vie moyenne (15ans) d'un sol en vinyle montre que 45% du DEHP est encore présent dans le matériau à sa fin de vie. Ceci transfère les impacts sur le cycle de vie du revêtement de sol, soulevant des problématiques d'éco-toxicité lors de sa mise en décharge.

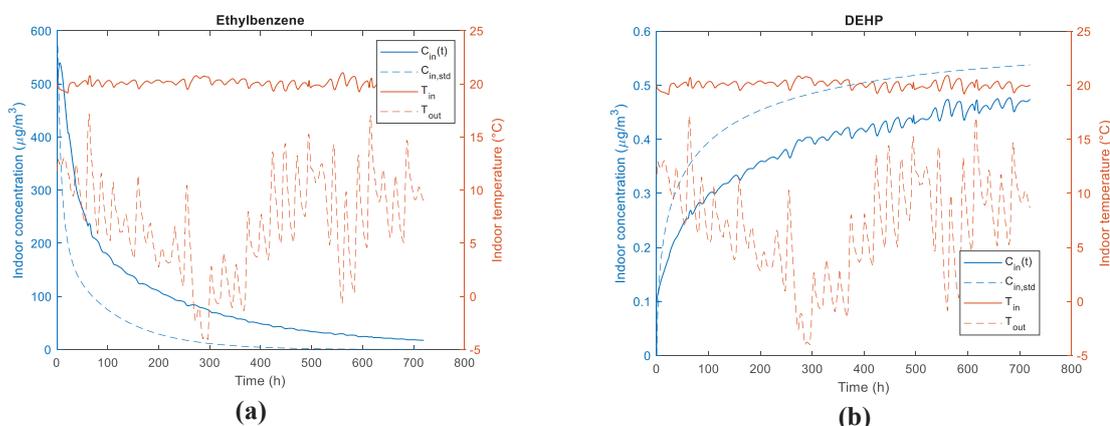


Figure 1. Simulation dynamique de la concentration intérieure pendant un mois d'hiver avec ($C_{in}(t)$) et sans ($C_{in,sta}$) considération de la température pour (a) l'éthylbenzène et (b) le DEHP

4.3. Impact des solutions de conception

La Figure 4 (a) présente les effets principaux des solutions de conception sur le PiF et la consommation énergétique. Le taux de renouvellement d'air impacte de manière la plus conséquente les deux sorties mais illustrent bien le transfert d'impact pour lequel une augmentation du taux de renouvellement de l'air diminuera l'exposition humaine de 78% mais augmentera la consommation d'énergie de 57%. L'importance du taux de renouvellement sur le PiF s'explique par le fait que 99% des effets de l'éthylbenzène sur l'exposition sont dus à l'inhalation et donc qu'une diminution de la concentration intérieure diminue fortement le PiF. Le chauffage au sol entraîne une augmentation de la température du revêtement de sol et de la chape, et donc une diffusion plus rapide des polluants jusqu'à la surface du sol sur laquelle l'ingestion de poussière et le contact main-bouche des enfants sont fréquents. Ceci explique l'augmentation de 6% et 5% du $PiF_{ingestion}$ et $PiF_{dermal\ contact}$ respectivement lorsque qu'un chauffage au sol est installé. L'utilisation d'un échangeur de chaleur quant à lui permet de réduire la consommation d'énergie (-32%) sans compromettre l'exposition intérieure.

Le taux de renouvellement de l'air étant un paramètre clé pour les transferts de chaleur et de masse, son impact sur la concentration et la consommation énergétique avec (diamants) et sans (cercles) échangeur de chaleur est évalué à la Figure 4 (b). L'éthylbenzène présente une dynamique de sorption / désorption rapide conférée par un faible K_{ma} , qui se traduit par une forte diminution de la concentration intérieure (et donc du PiF) lorsque le taux de renouvellement de l'air est supérieur à 0,2 vol/h. Le meilleur compromis peut être identifié au début de l'asymptote lorsque l'exposition intérieure n'augmentera pas sensiblement (<15%) mais que la consommation d'énergie diminuera (ici $q = 0,6\ l/h$).

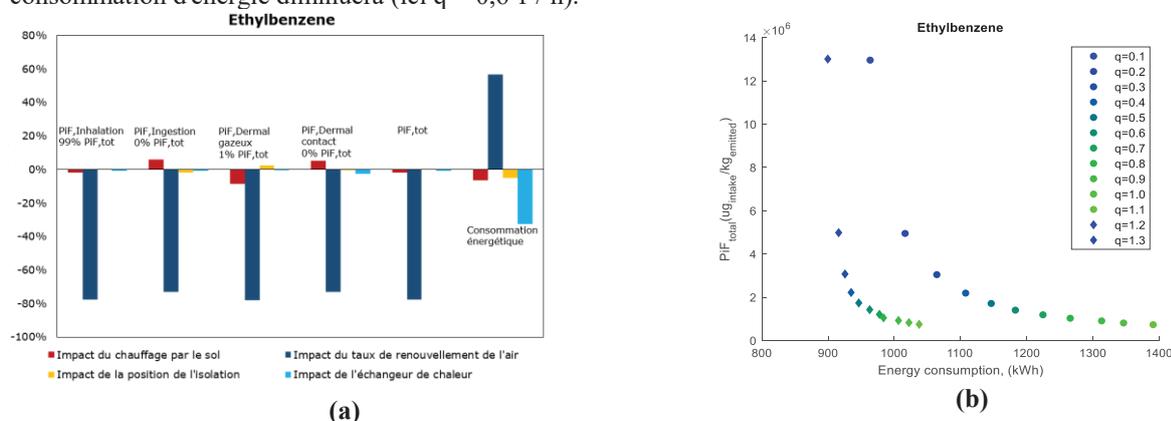


Figure 4 (a) Impact de quatre choix de conception sur le PiF et la consommation d'énergie pour l'éthylbenzène et **(b)** dose d'exposition à l'éthylbenzène et consommation énergétique pour différents taux de renouvellement d'air, avec (diamants) et sans (cercles) échangeur de chaleur

5. Conclusion

Si la problématique de la qualité de l'air intérieur est désormais élevée au rang de risque majeur pour la santé, celle-ci est encore mal traitée en phase conception des bâtiments. Afin de guider la conception de bâtiments sains à haute-efficacité énergétique, nous avons développé un modèle couplé de transferts de masse et de chaleur permettant d'évaluer de manière cohérente l'impact des choix de conception sur la qualité de l'air intérieur. Le modèle développé permet de quantifier l'impact de la température dans des conditions standards du bâtiment sur les coefficients de transferts de masse au sein des matériaux couramment utilisés dans l'enveloppe des bâtiments afin de mieux rendre compte de la dynamique des émissions des composés organiques volatiles et semi-volatiles depuis les matériaux de construction jusque dans l'air intérieur. Quatre systèmes de conception ont été étudiés afin de mettre en lumière les transferts d'impacts entre exposition humaine et consommation énergétique. Les incertitudes associées aux paramètres d'entrées sont en cours d'exploration à l'aide d'une analyse de sensibilité globale [SOB 93]. Si actuellement la ventilation est encore perçue comme le principal levier d'action sur la qualité de l'air intérieur, cette étude permet d'ouvrir cette problématique vers d'autres systèmes de conception. L'étude de la dynamique journalière des émissions de COSVs mettent en avant l'importance du choix des matériaux et de leurs épaisseurs pour contribuer à déphaser suffisamment les taux de concentration intérieure tout en gardant un taux de ventilation faible. Ceci amène à réfléchir au choix des matériaux dans une double optique de réguler les transferts thermiques et de masse de polluants. L'impact des matériaux dits « écologiques » ou « sains » sur la qualité de l'air intérieur et le confort thermique pourrait être quantifié.

6. Bibliographie

- BEKO, G., WESCHLER, C. J., LANGER, S., CALLESEN, M., TOFTUM, J., & CLAUSEN, G. Children's Phthalate Intakes and Resultant Cumulative Exposures Estimated from Urine in Their Homes and Daycare Centers, 2013
- DENG, B., & KIM, C. N. An analytical model for VOCs emission from dry building materials. *Atmospheric Environment*, 2004
- EUROPEAN PARLIAMENT *Directive on energy performance of buildings*, 2018
- GASPAR, F. W., CASTORINA, R., MADDALENA, R. L., NISHIOKA, M. G., MCKONE, T. E., & BRADMAN, A. Phthalate exposure and risk assessment in California child care facilities. *Environmental Science and Technology*, 2014.
- GUO, Z. A Framework for Modelling Non-Steady-State Concentrations of Semivolatile Organic Compounds Indoors: Emissions from Diffusional Sources and Sorption by Interior Surfaces, 2013
- HARISH, V. S. K. V., & KUMAR, A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016
- HOLMGREN, T., PERSSON, L., ANDERSSON, P. L., & HAGLUND, P. A generic emission model to predict release of organic substances from materials in consumer goods. *Science of the Total Environment*, 2012.
- HUANG, L., FANTKE, P., ERNSTOFF, A., & JOLLIET, O. A quantitative property-property relationship for the internal diffusion coefficients of organic compounds in solid materials. *Indoor Air*, 27, 2017
- HUANG, L., & JOLLIET, O. A quantitative structure-property relationship (QSPR) for estimating solid material-air partition coefficients of organic compounds. *Indoor Air*, 2018
- JOLLIET, O., ERNSTOFF, A. S., CSISZAR, S. A., & FANTKE, P. Defining Product Intake Fraction to Quantify and Compare Exposure to Consumer Products. *Environmental Science and Technology*, 49, 2015
- KHALIFA, & MARSHALL Validation of heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-sized indoor test cell, 1990
- LIANG, Y., & XU, Y. Emission of phthalates and phthalate alternatives from vinyl flooring and crib mattress covers: The influence of temperature. *Environmental Science and Technology*, 2014
- LIU, C., ZHANG, Y., BENNING, J. L., & LITTLE, J. C. The effect of ventilation on indoor exposure to semivolatile organic compounds. *Indoor Air*, 25, 2015
- MACINTOSH, D. L., MINEGISHI, T., FRAGALA, M. A., ALLEN, J. G., COGHLAN, K. M., & STEWART, J. H., Mitigation of building-related polychlorinated biphenyls in indoor air of a school, 2009
- MONTGOMERY C., D. *Design and Analysis of Experiments*, 2007
- SOBOL, I.M. « Sensitivity indices for nonlinear mathematical models ». *Mathematical Modelling and Computational Experiment*, 1993
- WEI, W., RAMALHO, O., & MANDIN, C. A long-term dynamic model for predicting the concentration of semivolatile organic compounds in indoor environments: Application to phthalates. *Building and Environment*, 148, 2019
- WESCHLER, C. J. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmospheric Environment*, 43, 2009
- YAN, D., SONG, F., YANG, X., JIANG, Y., ZHAO, B., ZHANG, X., ... SAHM, M. An integrated modeling tool for simultaneous analysis of thermal performance and indoor air quality in buildings. *Building and Environment*, 43, 2008