

HUMIDITÉ ET VENTILATION DU GRENIER

T.W. Forest et I.S. Walker

Département de génie mécanique
Université d'Alberta
Edmonton (Alberta) CANADA T6G 2G8

Mars 1993

Rapport final à l'intention de
la Société canadienne d'hypothèques et de logement

NOTE: ISSUED ALSO IN ENGLISH UNDER THE TITLE:

ATTIC VENTILATION AND MOISTURE

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS ET STIPULATION	1
ABRÉGÉ	2
1. OBJECTIFS ET HISTORIQUE	3
2. PROGRAMME D'ESSAIS SUR LE TERRAIN	4
2.1 Mesures à l'intérieur du grenier	4
3. MISE AU POINT DU MODÈLE	5
3.1 Modèle de ventilation	5
3.2 Modèle thermique	7
3.3 Modèle d'humidité du grenier	7
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	9
4.1 Mesures et prédictions comparatives	9
4.2 Simulations en grenier	15
5. CONCLUSIONS	20

REMERCIEMENTS ET STIPULATION

La présente étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse doctorale pour M. I.S. Walker, aux termes d'un contrat avec la SCHL. L'analyse, les interprétations et les recommandations sont celles des auteurs et ne représentent pas nécessairement les vues de la Société canadienne d'hypothèques et de logement. Des fonds ont également été accordés par le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, ainsi que par le CRSNG dans le cadre du programme des conventions de recherche.

Les auteurs remercient Mark Ackerman, Wayne Pittman et John Foy de leur assistance technique au Alberta Heating Research Facility.

ABRÉGÉ

La méthode courante propre à contrôler l'humidité et la surchauffe des greniers résidentiels consiste à les ventiler avec l'air extérieur. Elle est reconnue dans le Code du bâtiment, qui exige que l'aire totale de ventilation soit de $1/300^{\text{e}}$ de l'aire de plancher du grenier. Cependant, nous ne savons pas très bien quel est l'apport de ventilation et quelle est son incidence sur l'accumulation d'humidité dans les greniers. La présente étude devrait donc apporter certains éléments de réponse à ces questions.

Il y a deux parties à la présente. En premier lieu, des mesures détaillées ont été effectuées à l'intérieur de deux greniers dans une installation d'essai sur le terrain. Des instruments ont été installés dans ces greniers pleine dimension dans le but de mesurer sur une période de deux ans les taux de ventilation, les taux d'échange d'air entre l'intérieur de la maison et le grenier, les températures et la teneur en humidité. Ensuite, un modèle a été mis au point pour prédire le régime d'humidité d'un grenier selon une configuration donnée de fuites et certaines conditions météorologiques. Il a été subdivisé en trois sous-modèles interactifs, à savoir un modèle de ventilation qui prédit les taux de ventilation du grenier (et les taux de ventilation à l'intérieur de la maison) avec les intrants susmentionnés, un modèle thermique qui prédit la distribution de la température, et un modèle d'humidité qui prédit la distribution d'humidité à l'intérieur du grenier. Le modèle, qui a été confronté aux données prélevées sur le terrain, concordait dans une mesure raisonnable avec ces dernières.

Le modèle a été utilisé dans un certain nombre de simulations. D'abord, plusieurs simulations paramétriques ont été exécutées en variant systématiquement les paramètres de la configuration du grenier et ceux du climat. Il s'agissait notamment des fuites du grenier, de l'utilisation d'un dispositif de ventilation, de la température et de l'humidité relative extérieure, de la vitesse éolienne et du degré d'ennuagement. Ces résultats ont permis de cerner les paramètres qui ont une grande incidence sur le niveau d'humidité des greniers. Une seconde série de simulations saisonnières ont été effectuées au moyen des données météorologiques réelles de certaines villes canadiennes situées dans différentes zones climatiques.

Le présent rapport met l'accent sur certaines mesures et quelques calculs basés sur le modèle. Pour obtenir plus de détails sur ces résultats, on pourra se procurer l'annexe du rapport auprès de la Société canadienne d'hypothèques et de logement.

1. OBJECTIFS ET HISTORIQUE

La ventilation, méthode couramment employée pour contrôler l'humidité dans les greniers, consiste à pratiquer des ouvertures dans l'enveloppe du grenier en guise d'aspirails. Le Code du bâtiment fait état de la règle de «1:300» pour les événements de grenier. Toutefois, il existe peu de mesures des taux types de ventilation des greniers, et encore moins de l'interaction de l'air ventilé et de l'humidité à l'intérieur d'un grenier exposé aux fluctuations climatiques. La présente étude a pour objet de mettre au point et de vérifier un modèle exhaustif qui permettrait de prédire le taux de ventilation du grenier, ainsi que la distribution de la température et de l'humidité selon une certaine configuration de fuites d'air dans le grenier et sous des conditions météorologiques particulières. Ce modèle pourrait donc être utilisé pour effectuer des simulations réalistes des conditions du grenier et d'examiner diverses techniques de ventilation propres à contrôler l'humidité.

Plusieurs études ont été axées sur la modélisation de la dynamique hygrométrique dans des greniers ventilés. Tous ces modèles visaient à décrire de manière détaillée l'interaction des composants de bois (revêtement et fermes du toit) et de l'air du grenier. La modélisation du bois a notamment été réalisée avec une mince couche de surface sur laquelle l'air du grenier agit rapidement, et constituant un médium qui emmagasine ou dégage de l'humidité sur une courte période. Dans tous les modèles, le plus important médium de transport de l'humidité était celui associé à la circulation du volume d'air de l'extérieur par convection (flux de ventilation) et l'air de la maison s'infiltrant dans le grenier. Il est regrettable que nous ignorions les valeurs relatives aux flux de ventilation et aux taux d'échange de l'air intérieur et du grenier, ou comment cette circulation fluctue en fonction de la configuration des fuites d'air dans le grenier et des conditions ambiantes. À cause de ces lacunes, ces modèles hygrométriques ne sont que des études paramétriques pour lesquelles il faut stipuler des taux de ventilation et d'échange d'air.

L'étape clé de la présente étude sur l'humidité dans les greniers a été l'intégration d'un modèle de ventilation qui déroge légèrement des modèles hygrométriques existants. Le modèle de ventilation et le modèle combiné ont été vérifiés avec les données recueillies à l'Alberta Home Heating Research Facility au cours d'une période d'essai de deux ans. Pendant ce temps, les taux de ventilation, les taux d'échange de l'air intérieur et du grenier, les températures, l'humidité relative et la teneur en humidité du bois ont été mesurés dans deux greniers dont les configurations de fuites étaient différentes. Le modèle combiné a servi à simuler la performance des greniers au cours de saisons de chauffage complètes, dans un climat donné, pour savoir quel était l'effet de différentes configurations de grenier sur l'accumulation d'humidité saisonnière. D'autres techniques de ventilation ont également été simulées par des moyens mécaniques en vue de déterminer le niveau optimal de ventilation propre à bien contrôler l'humidité.

Voici un résumé de la mise au point du modèle, des mesures sur le terrain et des simulations. Une annexe comportant plus de détails sur ces travaux est disponible à la Société canadienne d'hypothèques et de logement.

2. PROGRAMME D'ESSAIS SUR LE TERRAIN

2.1 Mesures à l'intérieur du grenier

Entre 1990 et 1992, les taux de ventilation, taux d'échange de l'air intérieur et du grenier, températures et teneurs en humidité ont été mesurés à l'intérieur de deux greniers de configuration différente à l'Alberta Home Heating Test Facility, qui se trouve près d'Edmonton (Alberta). Cette installation renferme une rangée de six maisons d'un étage avec un grenier au bout du pignon, face est-ouest. On trouvera à la figure 1 une vue isométrique de ces maisons utilisées pour les essais, dont les dimensions sont de 6,7 m sur 7,3 m. Le volume du grenier était estimé à 61 m³. La configuration d'un des greniers était «étanche» où, à dessein, aucun aspirail n'existait, alors que l'autre comportait des sous-faces aux extrémités nord et sud, de même que deux événements d'entretoit, l'aire totale de ventilation étant conforme au Code (1:300). Pour mesurer les fuites d'air de fond, il a fallu bloquer les événements d'entretoit et effectuer des essais de pressurisation du grenier au moyen d'un ventilateur. Un double système de souffleries a été employé, une première soufflerie servant à mettre le grenier sous pression et l'autre à maintenir la même pression à l'intérieur de la maison que dans le grenier.

Les taux de ventilation de l'intérieur et du grenier ont été mesurés au moyen d'un système à gaz détecteur double. Pour déterminer les taux de ventilation, on a mesuré le volume de gaz détecteur nécessaire au maintien d'une concentration constante de 5 ppm, puis la concentration d'un des gaz détecteurs dans une zone où il n'avait pas été introduit, pour connaître le flux des fuites interzonales. Des thermocouples ont été utilisés pour mesurer les températures, tandis que des détecteurs d'humidité relative ont permis de déterminer la teneur en humidité de l'air du grenier, et des tiges à résistance électrique ont été placées dans le bois pour en mesurer la teneur en humidité. Ces données ont été recueillies parallèlement aux conditions météorologiques ambiantes sur les lieux de l'essai. À l'instar de tout essai sur le terrain, il fallait prélever suffisamment de mesures pour couvrir toutes les conditions ambiantes et ainsi obtenir des données utilisables. Les mesures de ventilation portaient sur la vitesse et la direction du vent, de même que la température extérieure. D'après les expériences antérieures sur les lieux de l'essai, il faut en général faire des prélèvements pendant au moins un an : les taux de ventilation du grenier qui figurent dans la présente étude proviennent d'un fichier comportant au-delà de 4 000 valeurs horaires moyennes, ce qui est suffisant pour dégager des tendances bien définies. On trouvera plus loin un échantillon de ces données, et un tableau complet de ces dernières en annexe.

3. MISE AU POINT DU MODÈLE

3.1 Modèle de ventilation

Le modèle de ventilation comporte deux zones, l'intérieur de la maison et le grenier, qui sont reliées ça et là par des fuites interzonales. Le modèle de ventilation maintient l'équilibre de la masse d'air dans les deux zones, pour permettre le calcul des débits de ventilation. D'abord, tous les points de fuite sur l'enveloppe extérieure de la zone sont divisés en trois catégories. Il est présumé que les fuites de fond de l'enveloppe sont associées aux menues fissures et trous répartis uniformément sur toute l'enveloppe de la zone. Elles sont caractérisées par le coefficient de flux C et l'exposant de flux n dans l'équation

$$\dot{m} = \rho C \Delta P^n$$

où \dot{m} représente le taux de flux de la masse d'air et ρ représente la densité de l'air; le coefficient de flux, C , et l'exposant, n , ont été établis à partir d'essais de pressurisation de la zone à l'étude au moyen d'un ventilateur. Les événements passifs sont des secteurs de fuite spécifiques au site, tels événements de toit, conduits de fumée, fenêtres ouvertes, etc. Chacun de ces secteurs de fuite se caractérise par ses propres valeurs de C et n ; dans de nombreux cas, ces grandes surfaces de fuite se comportent comme des orifices où C est lié à l'aire libre nette de l'événement et n est à peu près égal ou égal à $1/2$. Enfin, les événements actifs désignent les secteurs de fuite où des ventilateurs ont été montés sur l'enveloppe; on a incorporé au modèle de ventilation les caractéristiques de pression et de flux du ventilateur afin que le débit de la masse qui traverse le ventilateur puisse varier en fonction des conditions ambiantes.

Une fois que les secteurs de fuite ont été cernés, le taux de débit de la masse à travers chaque type de secteur de fuite est exprimé selon les écarts de pression locale comme

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ref}} - \Delta P_T H + \Delta P_w C_p S_w^2$$

où ΔP est l'écart de pression extérieure-zone, ΔP_{ref} est l'écart de pression extérieure-zone à la hauteur de référence (dans ce modèle, le niveau du sol sert de point de référence), et H est la hauteur au-dessus du sol d'un emplacement où il y a des fuites, ΔP_T est la variation verticale de la pression hydrostatique de la zone extérieure (fonction de l'écart de température de la zone extérieure) et donne l'écart de pression dû à l'effet de cheminée lorsque multiplié par H ; enfin la pression éolienne où C_p est le coefficient de pression, S_w est le facteur de protection (défini comme le rapport entre la vitesse du vent à un endroit protégé, sur la vitesse à un endroit sans protection, à la hauteur de l'avant toit). On obtient les coefficients de pression sur un côté de la maison au moyen des mesures prises dans un tunnel aérodynamique, afin de pouvoir les utiliser dans le modèle de ventilation comme les coefficients de pression étalés sur

l'ensemble des murs. Ces coefficients de pression sont rattachés dans une grande mesure à la direction du vent, et une nouvelle fonction d'interpolation sert à calculer les coefficients de pression en tant que fonction continue de l'angle du vent. Les facteurs de protection, S_w , qui tiennent compte de la perte de vitesse du vent due à un obstacle, ont des valeurs allant de 0 (protection complète) à 1 (aucune protection). Par conséquent, les maisons isolées et les maisons en rangée étroites ont des facteurs de protection très divergents, dont on a d'ailleurs tenu compte dans le modèle de ventilation. Pour toutes les fuites d'air d'une zone en particulier, le dénominateur commun est l'écart de pression extérieure-zone, ΔP_{ref} , qu'il est possible d'expliquer par une mise en équation de la masse d'air s'introduisant dans une zone et la masse d'air quittant la zone. En général, la solution concernant l'équilibre du flux d'air requiert une itération pour chaque zone. En outre, on calcule l'interaction des deux zones par le débit de fuite interzonale à partir de l'écart de pression entre les deux zones et les caractéristiques des fuites interzonales; ainsi, d'autres itérations sont nécessaires entre les deux zones jusqu'à ce qu'on obtienne tous les équilibres de masse.

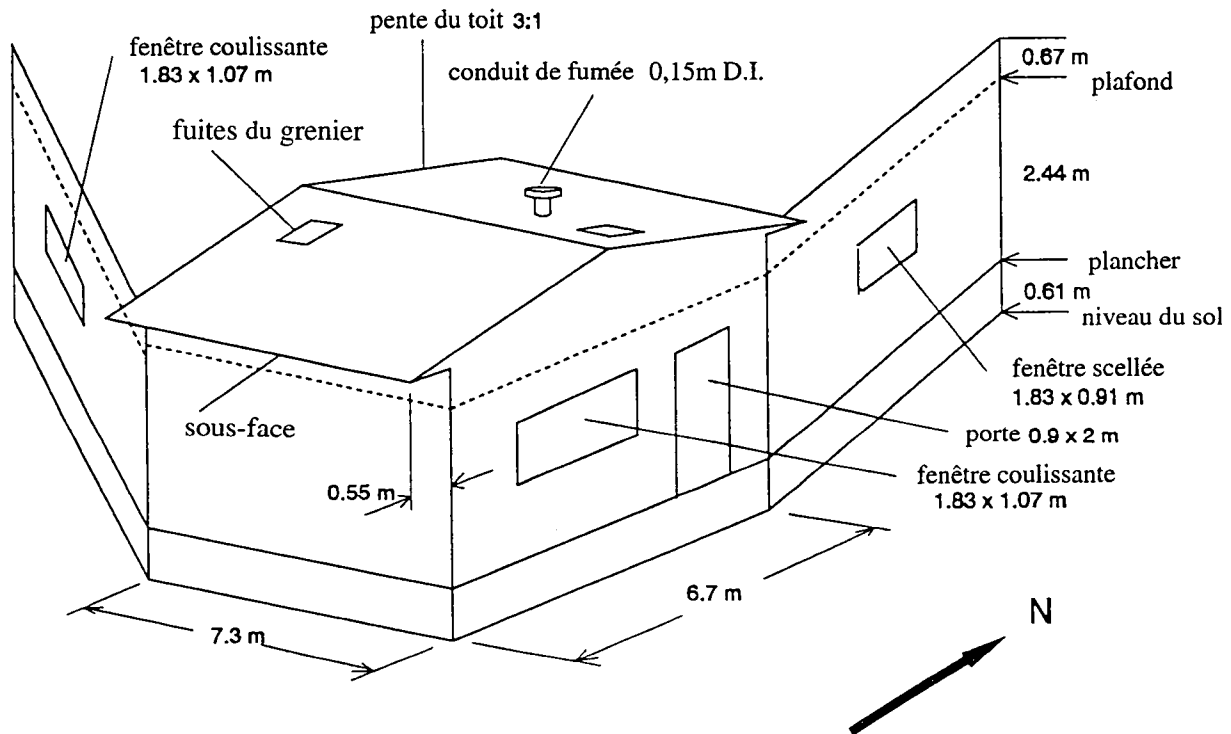


Figure 1 Vue isométrique d'une maison type de l'Alberta Home Heating Research Facility, montrant les détails pertinents et les dimensions.

3.2 Modèle thermique

Dans le calcul des taux de ventilation du grenier selon le modèle ci-dessus, il faut déterminer la température de l'air du grenier pour déterminer l'effet de «cheminée» et la densité de l'air exacts par rapport aux taux de débit de la masse. Dans le cas qui nous occupe, on présume que le grenier se trouve au bout du pignon (forme identique à celle de greniers utilisés dans les essais sur le terrain) et on adopte une méthode basée sur une capacité concentrée. Le grenier a été réparti en dix noeuds, et les surfaces inclinées du toit ont été désignées comme les plans nord et sud. Chacune des trois surfaces extérieures de l'enveloppe du grenier (les deux extrémités du pignon ont été groupées) ont été réparties en un noeud extérieur et un noeud intérieur; le plafond comporte un noeud intérieur et un noeud grenier; deux autres noeuds sont constitués de l'air du grenier (présumé homogène et à une température uniforme) et de la charpente en bois du grenier (solives et fermes). À chaque point nodal, on a établi une équivalence entre la somme des flux de chaleur vers le noeud et les fluctuations de l'énergie thermique du noeud; cette analyse s'imposait à ce stade pour saisir les variations de température diurnes à l'intérieur du grenier. Pour ce qui est de l'air du grenier, le flux de chaleur supplémentaire qui est associé à l'arrivée d'air de ventilation et aux fuites d'air de l'intérieur de la maison et du grenier a été inclus dans l'équilibre énergétique.

Pour déterminer la distribution de température, le régime transitoire à chaque point nodal a été estimé par un écart fini, en se basant sur un intervalle d'une heure. Ceci avait été fait pour assurer une concordance avec les mesures prises dans les greniers d'essai et établies comme valeurs horaires moyennes. Les équations ci-dessus, dont la température est linéaire, ont été calculées simultanément. Au moment du calcul des températures, la température de l'air du grenier a été appliquée à nouveau au modèle de ventilation du grenier pour pouvoir calculer un nouveau taux de ventilation du grenier. Cette nouvelle valeur a ensuite été utilisée dans le modèle thermique, au niveau du noeud de l'air du grenier, pour calculer les températures. Cette itération s'est poursuivie jusqu'à ce que la température de l'air du grenier fluctue de moins de 0,1°C. Étant donné que les taux de ventilation du grenier ne sont pas très sensibles à la température de l'air du grenier, il n'a normalement pas été nécessaire d'effectuer plus de cinq itérations entre le modèle thermique et le modèle de ventilation.

3.3 Modèle d'humidité du grenier

Le modèle d'humidité du grenier est basé sur la même capacité concentrée que celle du modèle thermique, sauf qu'il ne compte que sept noeuds. Les éléments critiques du grenier sont les composants de bois, c'est-à-dire les revêtements du toit face sud et nord, ainsi que les solives et fermes. Ces composants ont été divisés en deux noeuds : une mince couche de surface (3 mm d'épaisseur) et le bois de base. Le septième noeud, à savoir l'air du grenier, était présumé homogène et sous des conditions uniformes. Les

flux de diffusion et de convection à chaque point nodal (en utilisant la tension de vapeur comme force motrice) ont été mis en équation avec le taux de changement d'humidité au point nodal. Pour ce qui est de l'air du grenier, le flux supplémentaire d'humidité qui est associé à l'air de ventilation (qui transporte l'humidité de l'extérieur au grenier) et le flux des fuites intérieur-grenier (qui transportent l'humidité de l'intérieur au grenier) a été inclus dans l'équilibre d'humidité. Une importante caractéristique du modèle d'humidité est le rapport entre la teneur en humidité, la tension de vapeur et la température pour les composants de bois. Une équation empirique déjà établie pour cette relation a été incorporée en se basant sur les mesures supérieures à 0°C concernant la teneur en humidité en équilibre du bois. Cette équation a été utilisée pour ce modèle et extrapolée à des températures inférieures à 0°C lorsque l'équation prédisait que le refroidissement du bois, dont la teneur en humidité est initialement au-dessus du niveau de saturation des fibres, fait sortir l'humidité de la paroi cellulaire du bois, laquelle prend l'aspect d'une eau «non agglomérée» (ce comportement physique du bois devrait être éprouvé par des mesures détaillées). À des températures inférieures à 0°C, l'effet que ceci produit dans le modèle ressemble à du bois qui suinte, même si la teneur en humidité est de beaucoup inférieure au point de saturation des fibres.

On a commencé par uniformiser les équilibres d'humidité aux noeuds avec l'approximation du dérivé de temps comme l'écart fini basé sur un intervalle d'une heure. On a obtenu la tension de vapeur à chaque point nodal par la résolution d'une série d'équations linéaires en se fondant sur les résultats du modèle de ventilation et du modèle thermique. Pour chaque itération, la tension de vapeur à chaque point nodal a été comparée à la tension de saturation pour vérifier la possibilité de condensation. Si un noeud atteignait le point de saturation, la tension de vapeur était maintenue à cette valeur et la quantité de masse condensée s'accumulant à ce point était calculée à partir du flux net de la masse. Ainsi, le modèle a permis de dépister l'humidité qui se condensait ou s'évaporait sur l'un ou l'autre des sept noeuds. L'humidité s'est accumulée sur les surfaces les plus froides du grenier, si bien que le revêtement du toit constitue le composant le plus susceptible aux dommages causés par l'humidité.

Le modèle combiné propre à prédire l'humidité à l'intérieur d'un grenier est un outil de simulation qui ne requiert que les intrants suivants :

- configuration du grenier et distribution des fuites, dont les fuites de fond, les dimensions et l'emplacement des événements du grenier, et de tout ventilateur
- distribution des fuites dans la zone intérieure de la maison, y compris les fuites du plafond
- température intérieure et humidité relative
- emplacement de la maison (latitude pour calcul des gains d'énergie) et emplacement des obstacles avoisinants (pour calculer la protection contre le vent)

- conditions météorologiques ambiantes, y compris température extérieure, humidité relative, vitesse du vent, direction du vent, ennuagement et gains d'énergie solaire sur une surface horizontale ou verticale.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Mesures et prédictions comparatives

Une première comparaison des mesures et prédictions a été effectuée relativement au taux de ventilation du grenier, car le modèle de ventilation est lié de manière inextricable au modèle d'humidité. La figure 2a montre les taux de ventilation mesurés dans le grenier n° 5 (le grenier «étanche») comme fonction de la vitesse du vent, abstraction faite de la direction, et la figure 2b compare les données mesurées et stockées avec les prédictions du modèle de ventilation pour établir le taux de ventilation moyen. Les prédictions moyennes ont été réalisées en prédisant le taux de ventilation à l'heure, puis en établissant la moyenne. On trouve une comparaison similaire aux figures 3a et 3b pour le grenier n° 6 dont l'aire d'évent est conforme au Code. Les taux de ventilation du grenier n° 6 sont manifestement plus élevés que dans le grenier n° 5 en raison des événements supplémentaires. Les grands écarts entre les données caractérisent toutes les mesures des taux de ventilation prises sur le terrain; ils sont principalement attribuables à la protection que procurent les obstacles voisins (ici les maisons avoisinantes de rangée est-ouest). Si l'on examine les diverses directions du vent séparément, l'effet d'écran est évident; ceci est illustré à la figure 4a, pour le grenier n° 6 où 0° correspond aux vents du nord. Les directions nord et sud correspondent aux taux de ventilation les plus élevés parce que les greniers ne sont pas protégés de ces vents, tandis que les vents de l'est et de l'ouest produisent les taux de ventilation les plus faibles parce que la rangée de maisons constitue un bon écran. En ce qui a trait à ces données stockées, les prédictions du modèle de ventilation sont énoncées à la figure 4b; on peut voir que le modèle de ventilation est capable de très bien prédire la dépendance de l'angle du vent. Il est à noter que les taux de ventilation mesurés pour les greniers n° 5 et 6 illustrés aux figures 2 et 3 respectivement comprennent tous les écarts de température grenier-extérieur, ce qui inclut donc les taux de ventilation influencés par le vent et l'effet de cheminée. D'après les résultats figurant en annexe, l'effet de cheminée dans les greniers représente à lui seul un apport d'au plus 0,5 à 2 changements d'air l'heure (ca/h) pour les greniers n° 5 et 6 respectivement. Sur tous les écarts de vitesse éolienne et de température, la marge d'erreur moyenne dans le modèle de ventilation était de +3 % pour le grenier n° 6 et de -9 % pour le grenier n° 5.

Les taux d'échange d'air intérieur-grenier qui sont d'un grand apport au modèle d'humidité, ont été confrontés aux prédictions du modèle dans les figures 5 et 6 pour les greniers 5 et 6, respectivement. Il a été observé à partir de ces mesures que les taux d'échange d'air intérieur-grenier sont principalement fonction de l'écart de température entre l'intérieur et les greniers, ce qui laisse croire que le facteur le

plus important est l'effet de «cheminée» intérieur-grenier; il y avait une corrélation assez faible ou inexistante entre ce flux et la vitesse du vent, comme en fait état le rapport principal. Les prédictions du modèle concordent très bien avec les données mesurées, compte tenu des marges d'erreur moyennes de +4,5 % pour le grenier n° 5 et de +14,3 % pour le grenier n° 6.

Pour un certain temps durant la dernière année des essais, un petit ventilateur de 163 l/s (345 cfm) a été installé dans le grenier n° 6 et des essais ont été effectués pour deux configurations de circulation d'air. Le mode d'évacuation qui dépressurise le grenier (mode de fonctionnement normal) et le mode d'adduction, qui pressurise le grenier. Selon le débit mesuré, le ventilateur fournit 9,6 ca/h de flux de ventilation. Dans chacun des modes, une minuterie mettait le ventilateur en marche à 10 h et l'arrêtait à 16 h. On pourra constater l'influence exercée par le ventilateur sur les taux de ventilation du grenier aux figures 7a et 7b, pour les modes d'évacuation et d'adduction, sur certaines périodes de quatre jours. Lorsque la vitesse du vent est faible, le taux du ventilateur est presque équivalent au taux de ventilation coté; toutefois, par jour venteux, le flux du ventilateur augmente le flux de ventilation de fond. Les prédictions du modèle de ventilation sont illustrées dans chacune des figures, et l'on peut voir d'après les comparaisons que le modèle peut correctement «additionner» le flux du ventilateur au flux de ventilation de fond. La marge d'erreur moyenne pour les prédictions avec ventilateur était de -6,1 % pour le mode d'évacuation et de -4,3 % pour le mode d'adduction.

Le modèle combiné a ensuite été utilisé pour prédire les teneurs en humidité du grenier et les comparer avec les valeurs mesurées. Les noeuds les plus dynamiques étaient ceux de l'air du grenier et de la surface intérieure du bois. La température de l'air et l'humidité relative du grenier ont été mesurées, mais il n'a pas été possible de mesurer la teneur en humidité de la surface du bois. Les comparaisons des tensions mesurées et estimatives de vapeur de l'air du grenier sont présentées aux figures 8a et 8b, pour le grenier n° 6, sur deux périodes allant du 13 au 18 août 1991, et du 15 au 20 mai 1991. Il est évident dans ces figures qu'il y a un fort écart diurne au niveau de la tension de vapeur à l'intérieur du grenier n° 6, ce que le modèle combiné a pu signaler assez bien. Le bon rendement du modèle se manifeste lorsqu'on compare les tensions de vapeur du grenier et les valeurs ambiantes extérieures; puisque le grenier ne dépiste pas seulement, les conditions extérieures, il est nécessaire d'avoir un modèle pour prédire les conditions du grenier.

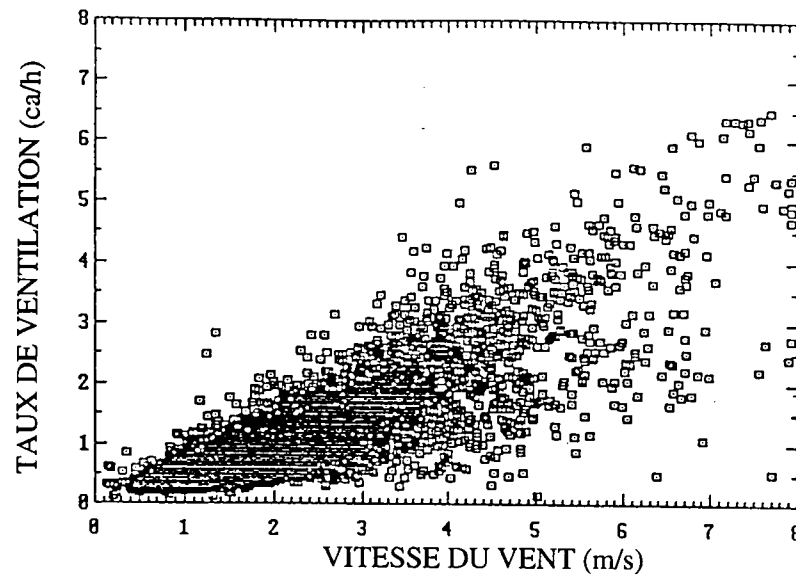


Figure 2a Taux de ventilation mesurés dans le grenier n° 5, pour toutes les vitesses éoliennes et tous les écarts de température (3 758 points).

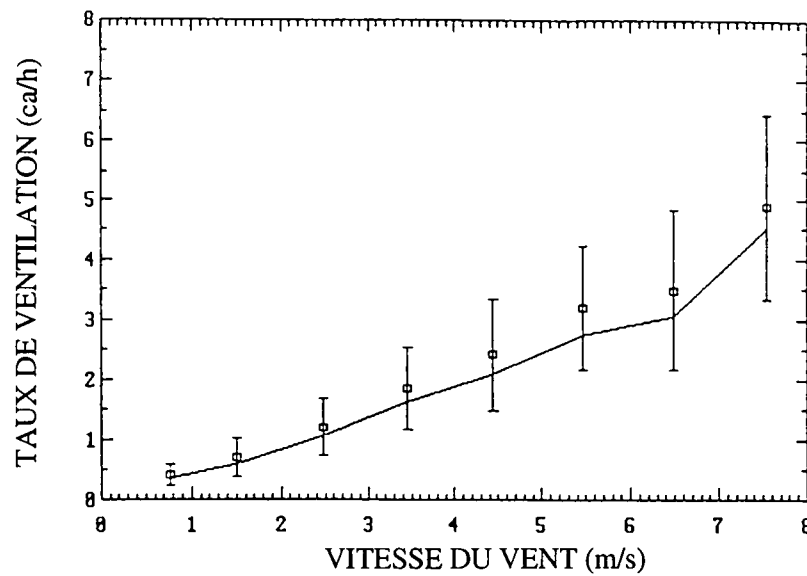


Figure 2b Taux de ventilation mesurés dans le grenier n° 5 (3 758 heures) avec courbe de prédiction pour toutes les températures et directions du vent.

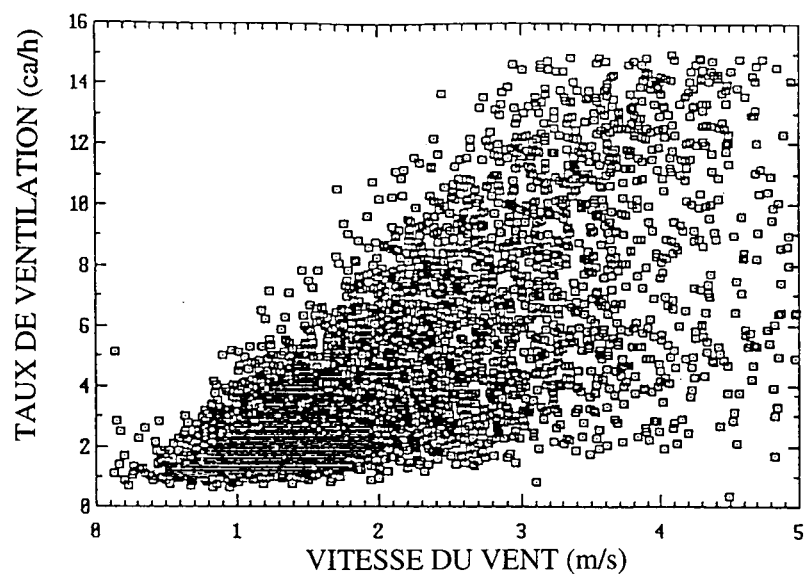


Figure 3a Taux de ventilation mesurés dans le grenier n° 6, pour vitesses éoliennes jusqu'à concurrence de 5 ms et tous les écarts de température (3 522 points).

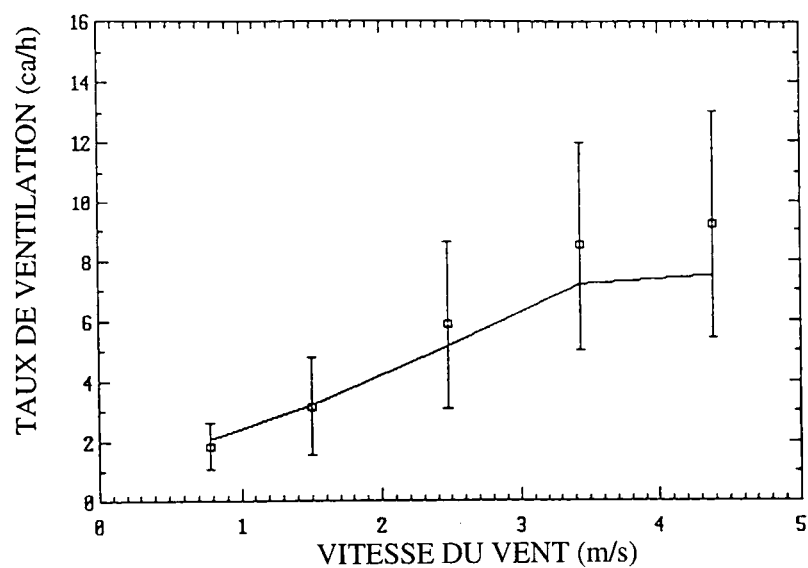


Figure 3b Mesures de ventilation stockées pour le grenier n° 6 (3 522 heures) avec courbe de prédiction pour toutes températures et directions du vent.

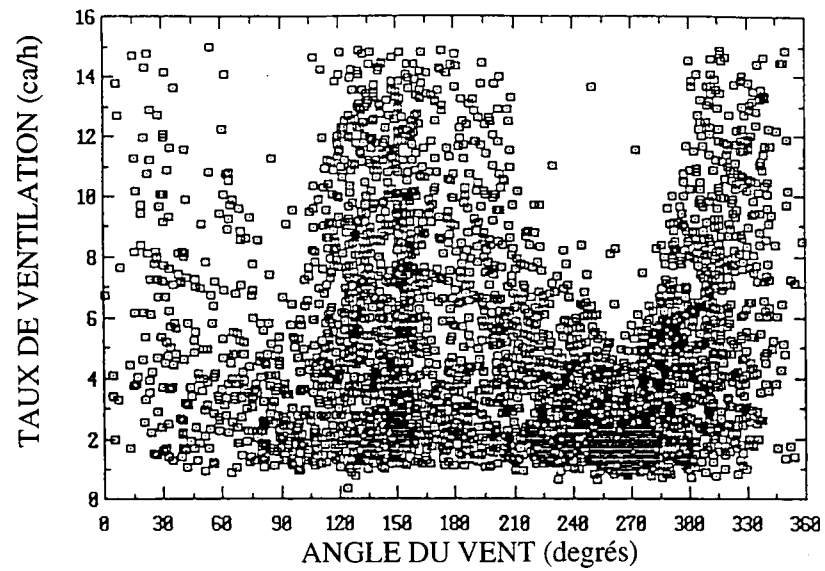


Figure 4a Variation des taux de ventilation mesurés pour le grenier n° 6, avec direction du vent (3 522 heures).

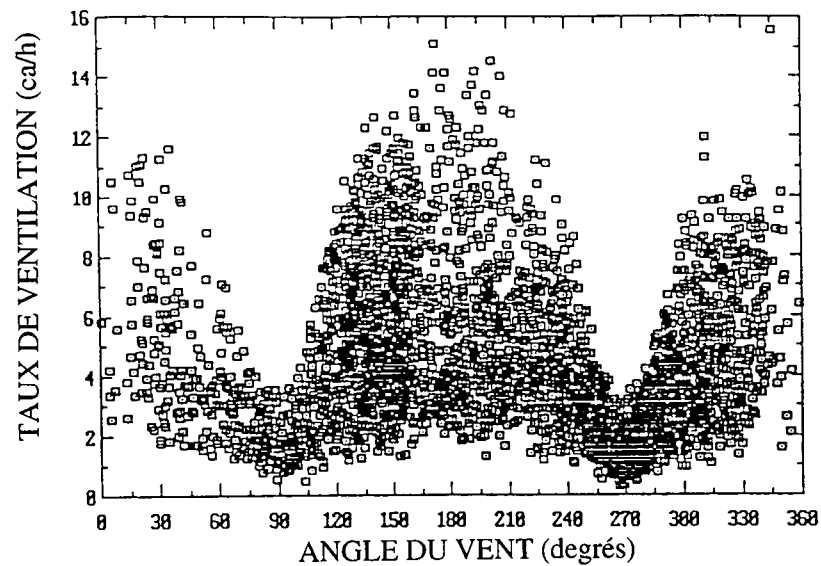


Figure 4b Variation des taux de ventilation estimatifs pour le grenier n° 6, avec direction du vent (3 522 heures).

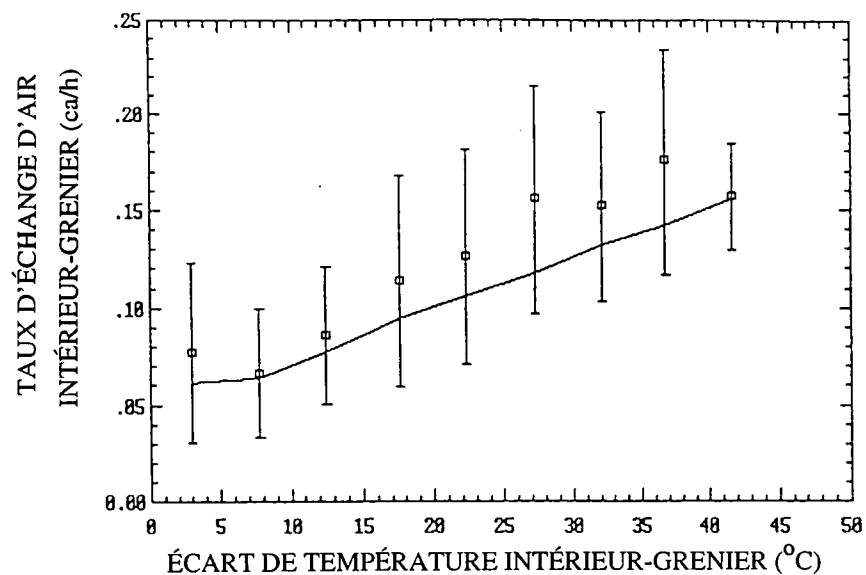


Figure 5 Comparaison des taux d'échange d'air intérieur-grenier mesurés (stockés) et estimatifs (courbe) pour le grenier n° 5, à des vitesses éoliennes de < 2m/s (990 heures) montrant un écart moyen et type des données mesurées (stockées) et une ligne reliant les valeurs estimatives moyennes pour chaque case.

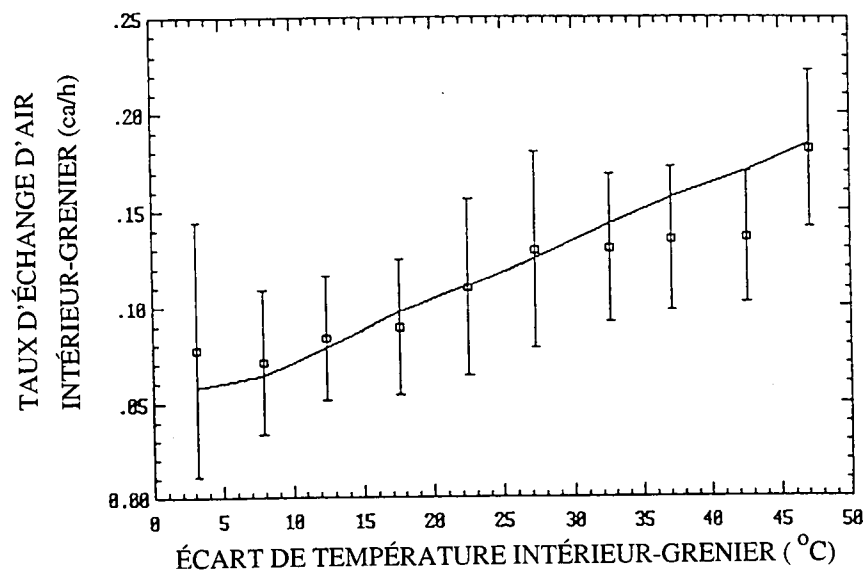


Figure 6 Comparaison des taux d'échange d'air intérieur-grenier mesurés (stockés) et estimatifs (courbe) pour le grenier n° 6, à des vitesses éoliennes de < 2m/s (722 heures) montrant un écart moyen et type des données mesurées (stockées) et une ligne reliant les valeurs estimatives moyennes pour chaque case.

4.2 Simulations en grenier

Le modèle combiné a été utilisé pour diverses simulations afin d'étudier la dynamique hygrométrique de l'intérieur du grenier. La première série de simulations consistait en une étude paramétrique où diverses configurations de fuites et les variations climatiques ont été modifiées systématiquement. La deuxième série était une simulation d'une saison de divers greniers dans différentes zones climatiques du Canada.

Des simulations paramétriques ont été réalisées pour déterminer quels facteurs climatiques et configurations de fuites entraînaient une accumulation d'humidité dans les greniers. Un petit échantillon de ces résultats obtenus au cours d'une période hivernale, dans un climat maritime est présenté au tableau 1. Ce climat maritime avait les propriétés constantes suivantes : température extérieure de -1°C , humidité relative extérieure de 100 %, ennuagement complet avec gains d'énergie solaire de pointe de 120 W/m^2 , et vitesse éolienne de 6 m/s du nord. La configuration de grenier normalisée qui a été employée pour la simulation était la suivante : grenier au bout du pignon dont le toit était incliné en direction est-ouest, volume de 38 m^3 , et aire de fuite totale de 4 Pa et de 1900 cm^2 , dont 50 % était un sous-toit sur les surfaces nord et sud, 45 % des événements de toit et 5 % des fuites de fond. Ce grenier standard a été comparé avec un grenier scellé ne comportant aucun événement ou sous-face, et une aire de fuite 4 Pa de seulement 134 cm^2 . Il était présumé que l'intérieur de la maison avait une température constante de 20°C et une humidité relative de 50 %, ainsi qu'une aire de fuite 4 Pa de 100 cm^2 , avec 20 % pour le plafond, 20 % pour le plancher et 60 % réparties uniformément sur tous les murs. Différentes configurations de ventilateurs ont également été mises à l'essai, dont un ventilateur d'évacuation produisant un taux de ventilation nominal de 14 ca/h, de même que des ventilateurs équilibrés, chacun produisant un taux nominal de 7 ca/h. Les quatre situations présentées au tableau 1 sont le grenier standard, le grenier scellé, le grenier scellé muni d'un ventilateur d'évacuation sur minuterie, et le grenier scellé avec ventilateurs équilibrés; chaque simulation paramétrique a été effectuée pour une semaine, la teneur en humidité initiale du revêtement du toit ayant été fixée à 15 %. Les résultats qui ont été totalisés correspondent au taux de ventilation du grenier et au taux d'échange de l'air intérieur-grenier (défini comme positif lorsque l'air s'introduit dans le grenier), à la température de l'air du grenier, à l'humidité relative du grenier, à la teneur en humidité des surfaces nord et sud du revêtement, ainsi qu'à la présence d'humidité excessive ou de condensation.

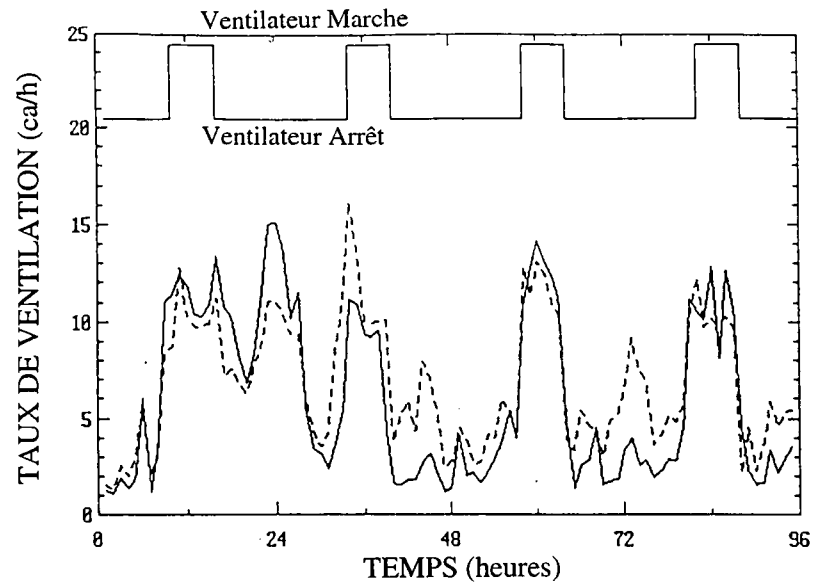


Figure 7a Taux de ventilation mesurés (ligne continue) et estimatifs (ligne brisée) pour le grenier n° 6, avec ventilateur d'évacuation fournissant 9,6 ca/h, de 10 h à 16 h chaque jour, du 17 au 20 janvier 1992.

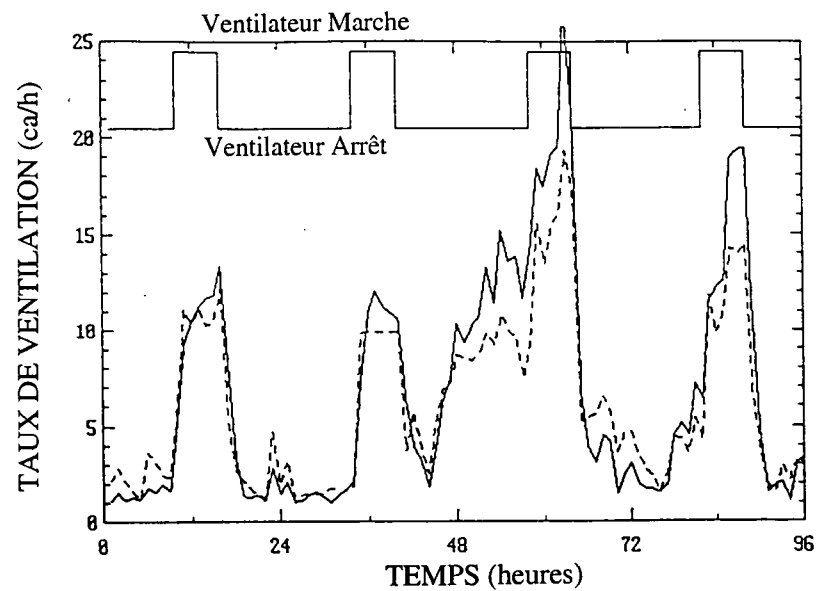


Figure 7b Taux de ventilation mesurés (ligne continue) et estimatifs (ligne brisée) pour le grenier n° 6, avec ventilateur d'adduction fournissant 9,6 ca/h, de 10 h à 16 h chaque jour, du 13 au 16 mars 1992.

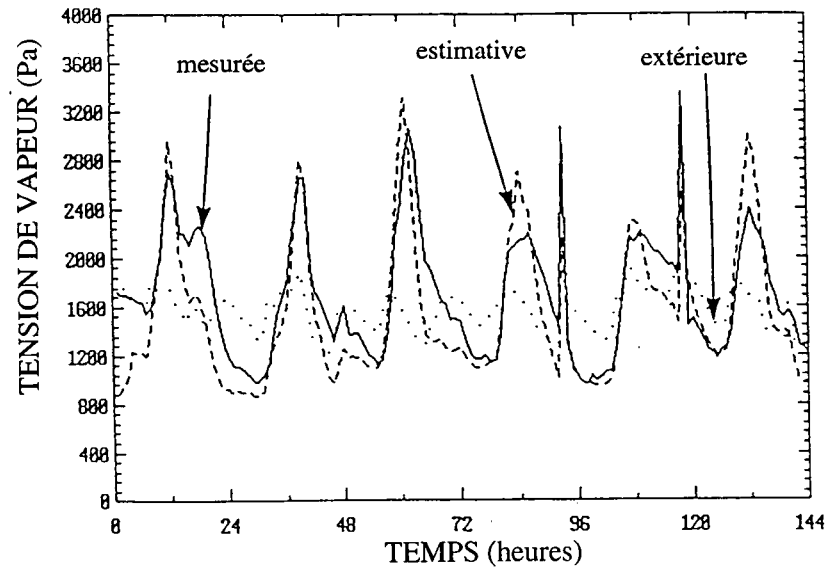


Figure 8a Tension de vapeur mesurée (ligne continue) et estimative (ligne brisée) pour le grenier n° 6 et tension de vapeur extérieure (ligne pointillée) sur une période de six jours du 13 au 18 août 1991.

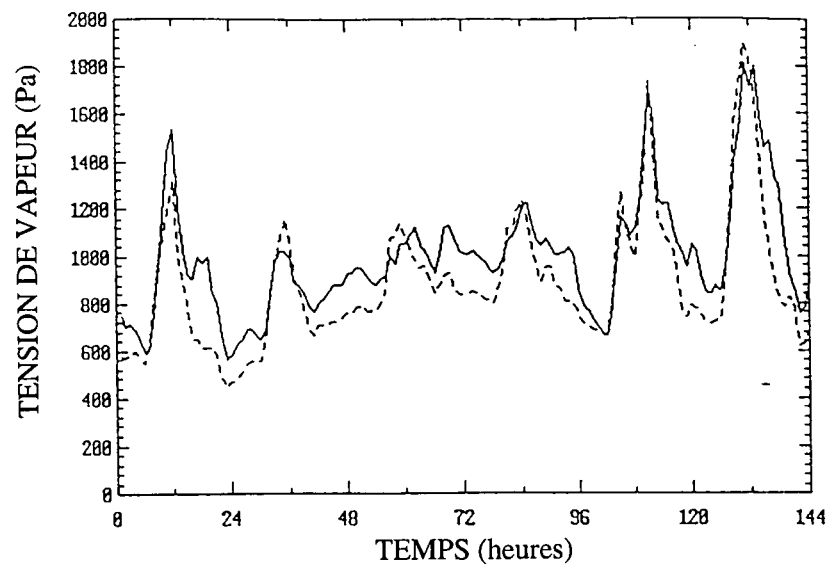


Figure 8b Tension de vapeur mesurée (ligne continue) et estimative (ligne brisée) pour le grenier n° 6 sur une période de six jours du 15 au 20 mai 1991.

Tableau 1
Simulations paramétriques sélectives pour climat maritime

Configuration du grenier	Taux de ventilation, ca/h <i>Grenier (plafond)</i>	Température de l'air du grenier °C <i>Moyenne (max, min)</i>	% HR grenier <i>Moyenne (max, min)</i>	Revêtement sud % TH <i>Moyenne (max, min)</i>	Revêtement nord % TH <i>Moyenne (max, min)</i>	Condensation
Standard	24 (-0,1)	-0,1 (1, -1)	91 (93, 90)	26 (27, 25)	26 (27, 25)	aucune
Scellé	0,7 (0,7)	1,5 (3, 1)	97 (97, 97)	32 (32, 32)	32 (32, 32)	1 kg/jour s'accumule sur nord et sud
Scellé avec ventilateur d'évacuation en marche de 9 h à 16 h	5,4 (1,3)	1,3 (3, 1)	97 (99, 96)	32 (32, 32)	32 (32, 32)	0,4 kg/jour s'accumule sur nord et sud
Scellé avec ventilateurs équilibrés	9 (0,8)	0,6 (2,0)	95 (96, 94)	29 (29, 29)	29 (29, 29)	aucune

La comparaison des résultats de ces quatre greniers révèle plusieurs caractéristiques intéressantes. Dans tous les cas, les conditions dans le grenier atteignent presque le point de saturation et demeurent plus ou moins constantes tout au long de la période de simulation. Ceci montre simplement que les conditions ambiantes sont relativement stables. Dans un grenier standard avec sous-face et évent d'entretoit, le taux de ventilation est élevé et la température de l'air demeure donc assez basse. Malgré ces températures

fraîches, le bois de revêtement ne devient pas humide outre mesure et il n'y a pas de condensation. Il pourrait toutefois en être autrement (i.e. teneur en humidité plus élevée sur le revêtement et condensation) si les conditions ambiantes changeaient, notamment s'il y avait un plus grand rayonnement de froid la nuit. Le fait de sceller le grenier (comme on le voit communément dans de nombreuses régions du Canada) fait baisser radicalement les taux de ventilation, donc réchauffe l'intérieur du grenier de manière assez considérable. Malheureusement, l'air de ventilation provient alors de l'intérieur de la maison, le grenier devient trop humide et l'accumulation nette d'humidité chaque jour sur le revêtement pourrait ultérieurement entraîner des problèmes. L'adjonction d'un ventilateur d'évacuation à l'intérieur du grenier scellé n'a pas été réellement bénéfique, malgré la ventilation accrue qu'elle a procuré. Cette augmentation de la ventilation a été contrebalancée par un taux deux fois plus élevé d'échange d'air intérieur-grenier, ce qui a causé la convection de l'humidité à l'intérieur du grenier. En somme, le ventilateur d'évacuation a permis de réduire légèrement le taux d'accumulation journalier d'humidité, mais ce grenier continuera d'afficher des problèmes d'humidité. Enfin, le grenier scellé a été aéré au moyen d'un système de ventilateur équilibré qui fonctionnait sans arrêt. Ceci s'est révélé une amélioration marquée par opposition au grenier scellé sans ventilation ou comportant un ventilateur d'évacuation, car on a empêché l'accumulation d'humidité sur le revêtement; par contre, la performance n'a pas été supérieure à celle d'un grenier standard; elle était même légèrement inférieure et le grenier contenait un peu plus d'humidité. Il s'agit des résultats de quelques-unes des nombreuses simulations paramétriques qui ont été réalisées et qui sont détaillées en annexe.

Certaines simulations saisonnières ont été effectuées au moyen de données météorologiques réelles. Au nombre des résultats types, notons la simulation d'un grenier standard au bout du pignon, dont l'aire d'évent est conforme au Code et est répartie entre les sous-faces et les événements d'entretoit, dans des conditions climatiques simulant celles de Whitehorse, au Yukon. On trouvera aux figures 9a à 9c les résultats concernant l'humidité relative de l'air du grenier, la teneur en humidité des surfaces de bois sur les revêtements nord et sud, ainsi que l'accumulation de masses en condensation sur le revêtement nord, sur une période allant du 10 octobre au 25 mars. Pour la majeure partie de la période de chauffage, l'humidité relative du grenier atteignait presque le point de saturation, tandis que la teneur désaisonnalisée en humidité des surfaces de bois était d'environ 15 % seulement. Par temps froid, l'humidité du bois ne peut augmenter beaucoup avant d'atteindre le point de saturation, comme il était mentionné dans la description du modèle d'humidité. En l'occurrence, il existe un lien direct entre la teneur en humidité du bois, la tension de vapeur et la température dans le modèle d'humidité. Ainsi, lorsque la teneur en humidité est faible, la masse condensée s'accumule sur les points nodaux en surface du bois, comme le montre la figure 9c, sur le revêtement nord.

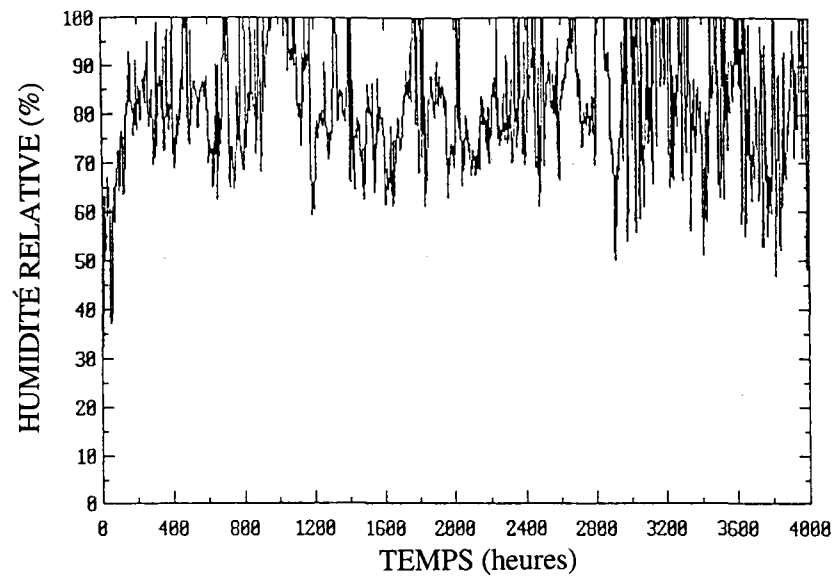


Figure 9a Humidité relative de l'air du grenier pour une simulation de grenier standard à Whitehorse (Yukon) du 10 octobre au 25 mars.

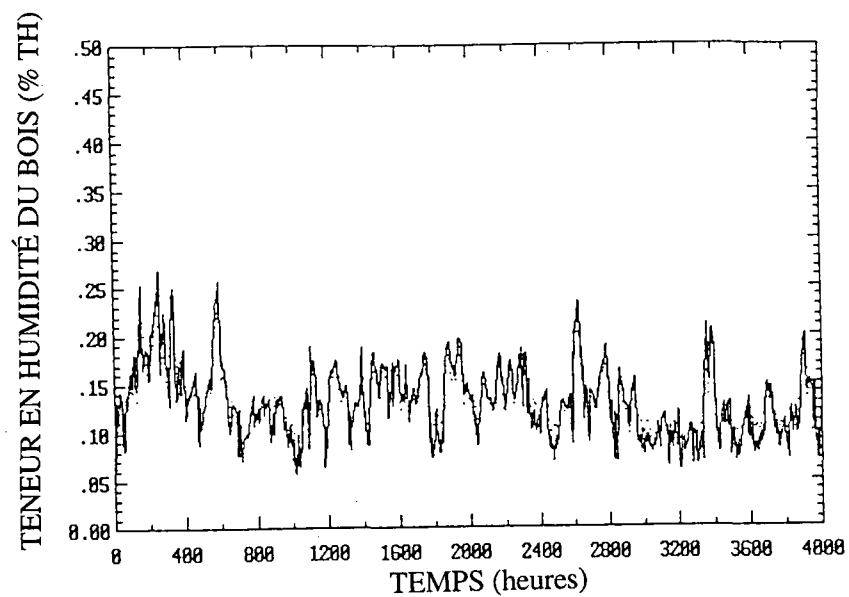


Figure 9b Teneurs en humidité du bois de surface sur les revêtements nord et sud et les fermes pour la simulation du grenier standard à Whitehorse (Yukon) du 10 octobre au 25 mars.

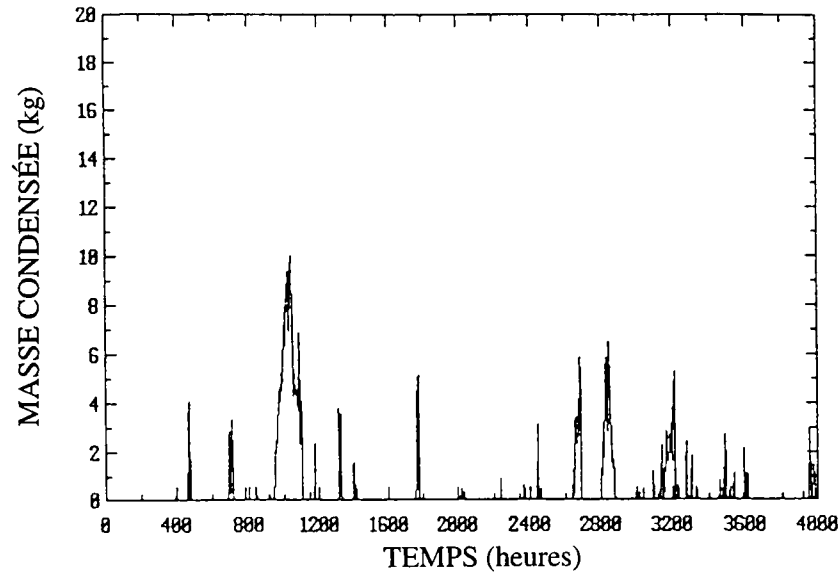


Figure 9c Masse condensée sur le revêtement nord pour la simulation du grenier standard à Whitehorse (Yukon) du 10 octobre au 25 mars.

5. CONCLUSIONS

Les observations suivantes ont été formulées à la suite des mesures de ventilation de grenier qui ont été réalisées sur une période de deux ans :

- les taux de ventilation de grenier étaient fortement influencés par l'action du vent, c'est-à-dire qu'il y a une corrélation importante entre le taux de ventilation et la vitesse du vent
- l'aire totale de ventilation du grenier requise par le Code du bâtiment fournit des taux de ventilation dans un grenier non protégé d'environ 3 ca/h (changements d'air l'heure) par m/s de vitesse du vent
- les taux de ventilation du grenier étaient sensibles à la direction du vent, surtout lorsqu'un obstacle en amont du vent procurait un écran; les taux de ventilation étaient de trois à quatre fois moins élevés en présence de maisons attenantes en rangée étroite
- les taux de ventilation associés à l'effet de cheminée étaient beaucoup moins élevés que les taux associés au vent; dans le grenier ventilé, les taux de pointe de ventilation associés à l'effet de cheminée étaient d'environ 2 ca/h
- l'effet de cheminée qu'entraînent les écarts de température intérieur-grenier exerçait le plus d'influence sur les taux d'échange de l'air intérieur-grenier; la corrélation entre ce flux et la vitesse du vent était faible.

Les relations complexes entre la dynamique hygrométrique de l'intérieur d'un grenier et les conditions météorologiques ambiantes ont été groupées dans un modèle combiné (ventilation, thermique et humidité), qui s'est révélé très proche des mesures sur le terrain. L'élément clé de ce dernier est le modèle de ventilation à double zone qui est capable de prédire correctement l'effet d'écran et la combinaison de ventilation mécanique et naturelle. Le modèle combiné a été utilisé dans différentes simulations et certaines conclusions préliminaires ont été tirées à partir de ce dernier :

- Dans un grenier, les deux sources importantes d'humidité sont l'humidité s'introduisant par convection à travers le plafond et l'humidité provenant de l'extérieur par le flux de ventilation. Beaucoup d'humidité pénètre à travers le plafond si le grenier est bien scellé et les taux de ventilation sont faibles. L'humidité attribuable au flux de ventilation est prédominante lorsque les taux de ventilation sont élevés, et posent un problème lorsque le revêtement se refroidit la nuit.
- Des taux de ventilation élevés n'ont pas réduit l'humidité relative de l'air du grenier, la teneur en humidité du bois ou la condensation, et les pires résultats étaient toujours associés à une vitesse éolienne élevée. Dans ce cas, l'humidité provient de l'air extérieur.
- Les greniers scellés affichaient des taux de ventilation faibles et étaient donc plus chauds que les greniers ventilés, mais ceci était contrebalancé par la circulation d'air intérieur-grenier qui amène de grandes quantités d'humidité par convection de l'intérieur de la maison au grenier. Il en résulte une teneur élevée en humidité dans le bois et des problèmes de condensation, dans toutes les zones climatiques.
- Un climat maritime entraîne toujours plus de problèmes d'humidité qu'un climat plus sec et tempéré comme dans les Prairies. L'air maritime extrait moins d'humidité du grenier que l'air plus sec des Prairies.
- La ventilation mécanique des greniers est optimisée si le ventilateur fonctionne le jour, lorsque les températures sont assez élevées et le potentiel d'extraction d'humidité est grand.
- Un seul ventilateur élimine bien l'humidité s'il est installé comme ventilateur d'adduction, car il pressurise le grenier suffisamment pour inverser la direction du flux d'air à travers le plafond. Une dimension optimale de ventilateur a été déterminée, qui pressurise suffisamment le grenier pour inverser le flux d'air par le plafond sans ventiler le grenier outre mesure. Dans le contexte des simulations, un ventilateur d'adduction assurant 5 ca/h a donné les meilleurs résultats.
- Dans les simulations pour lesquelles des ventilateurs équilibrés ont été utilisés dans des greniers scellés, il a été constaté que les conditions ambiantes sont importantes. Dans un climat sec et tempéré, on a conclu que les ventilateurs équilibrés réduisent la teneur en humidité du bois, alors que l'air maritime plus humide crée plus d'humidité dans le bois par opposition au grenier standard.

Il faudrait poursuivre les travaux pour vérifier certains des intrants dans un modèle intégral, plus particulièrement la relation humidité/tension de la vapeur/température pour le bois, ainsi que faire plus de simulations pour examiner la performance de l'enveloppe complète du grenier, avant de formuler des recommandations définitives. Le modèle mis au point pour la présente étude permettra de préciser ces recommandations.