

# L

# A PRESSION D'AIR ET L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

par Rick Quirouette, B.Arch.

Révisé novembre 2004

## RÉSUMÉ

La pression d'air varie beaucoup entre le côté intérieur et extérieur de l'enveloppe d'un bâtiment et entre les niveaux inférieurs et supérieurs des bâtiments multi-étages. Les effets de la pression d'air et de sa variation sur le mouvement de l'humidité sont mal compris des professionnels de la conception et de la construction.

Les gradients et les cycles de pression d'air causent de nombreux problèmes de structure et d'humidité, comme la pénétration et la condensation de l'humidité dans les cavités du toit et des murs extérieurs de même qu'au périmètre des fenêtres.



Figure 1 — Les effets des fuites d'eau par les murs

De plus, les différences de pression sont aussi indirectement responsables de la corrosion des fixations métalliques, de la pourriture du bois, des efflorescences sur la maçonnerie, de l'effritement de la brique et de la pierre, de l'utilisation excessive d'énergie et du contrôle inadéquat de la fumée. Les différences de pression d'air sont causées par cinq phénomènes — l'effet de tirage, la pressurisation attribuable au système de ventilation, le cycle éolien, le cycle barométrique ainsi que le cycle thermique.

Cet article examine les sources de pression, les gradients de pression de même que les éléments des bâtiments, particulièrement les cavités de l'enveloppe ou les vides, qui sont assujettis à ces cinq phénomènes. On y aborde aussi les façons de contrer, par la conception, les effets négatifs de la pression et des différences de pression d'air. Enfin, on explique dans l'article le concept de zone tampon dynamique (ZTD) élaboré récemment pour contrôler l'humidité dans l'enveloppe.



Ontario  
Association  
of Architects

Manitoba Association  
of Architects



## OBJECTIFS

Après avoir lu l'article, vous serez en mesure de comprendre :

1. Les points et les mécanismes d'infiltration d'humidité dans les bâtiments et leur enveloppe qui sont attribuables aux différences de pression;
2. La contribution aux problèmes d'humidité des principaux phénomènes qui créent ces différences de pression, de même que leur signification relative;
3. Les calculs fondamentaux pour l'établissement des différences de pression;
4. Les stratégies pour résoudre les problèmes de différences de pression attribuables aux effets mécaniques, thermiques et barométriques de même qu'aux effets de tirage.

## LA PRESSION D'AIR ET LES DIFFÉRENCES DE PRESSION D'AIR

La pression atmosphérique au niveau du sol est déterminée par le poids de la colonne d'air au-dessus de la surface de la terre, laquelle possède une hauteur d'environ 560 km. La pression d'air (ou le poids par unité de surface) varie avec la hauteur par rapport au niveau du sol. Le niveau de la mer est l'altitude de référence à laquelle la pression d'air atteint environ 101 300 Pa ou 101,3 kPa. La pression atmosphérique décroît au fur et à mesure qu'on s'élève au-dessus du niveau de la mer. À environ cinq km au-dessus du niveau de la mer, la pression atmosphérique chute approximativement de moitié pour se fixer à 54,0 kPa.

La différence de pression d'air résulte des variations de pression absolue d'une aire à l'autre. Ces variations peuvent découler de différences de la densité de l'air, comme l'effet de tirage en hiver, ou du vent qui balaie la surface d'un bâtiment. Les changements de pression barométrique et de température d'air à l'intérieur des cavités scellées peuvent aussi causer des variations. Les installations mécaniques comme la pressurisation attribuable au système de ventilation ou l'utilisation d'une ZTD produisent elles aussi des variations de la pression d'air.

La différence de pression d'air a deux effets importants sur les bâtiments : un effet mécanique sur les composants du bâtiment et une infiltration d'air par les ouvertures, les fissures ou les parcours des fuites d'air.

## LES EFFETS DES DIFFÉRENCES DE PRESSION

Le premier effet important des différences de pression, soit le phénomène qui agit sur les surfaces, pourrait être faible, comme l'effet de tirage ou la pressurisation attribuable au système de ventilation qui se situent généralement autour de 10 Pa à 50 Pa. Toutefois, même une faible différence de pression se maintenant pendant une période prolongée pourrait causer la fatigue et la défaillance des éléments de l'enveloppe du bâtiment. D'autre part, il peut s'agir d'un effet important comme l'effet du vent qui est capable de briser, déchirer ou déplacer les matériaux situés dans la cavité, de soulever une membrane de couverture et même d'arracher le parement des murs. Les concepteurs doivent tenir compte de cet effet, même s'il est rare, car la charge de calcul peut atteindre de 1 000 Pa à 2 000 Pa sur une période de 10 à 30 ans. De plus, les concepteurs ne peuvent négliger les effets du tirage ou de la pressurisation attribuable au système de ventilation étant donné qu'ils causent des problèmes d'humidité graves au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

Les différences de pression d'air ont un autre effet important, soit de causer des infiltrations d'air par les ouvertures, les fissures et les joints dans l'enveloppe. L'air s'infiltré à l'intérieur lorsque les pressions sont plus élevées du côté extérieur de l'enveloppe du bâtiment. L'air s'échappe à l'extérieur lorsque la pression d'air est plus élevée à l'intérieur de l'enveloppe. L'infiltration d'air est responsable de nombreux problèmes comme la condensation, la corrosion, la formation de glaçons sur les surfaces extérieures, l'effritement de la brique, le manque de contrôle de la température et de l'humidité intérieures de même que la déperdition d'énergie.

## LES CAVITÉS ET L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

L'enveloppe du bâtiment qui sépare les environnements intérieur et extérieur limite le transfert de la chaleur, de l'air, de l'humidité, du bruit, des flammes et de la poussière. Pour être efficace, elle doit résister à la pression accumulée à l'intérieur du bâtiment et aux différences de pression d'un endroit à l'autre de sa surface. Il est primordial que l'enveloppe empêche ou limite les fuites d'air.

La pression et les différences de pression agissent sur toutes les parties de l'enveloppe du bâtiment, mais leurs effets se situent généralement dans les cavités de l'enveloppe qu'il importe de soumettre à une analyse critique. Par exemple, un toit traditionnel est composé d'une membrane d'étanchéité, d'isolant, d'un pare-vapeur et d'un support de couverture. La cavité du toit pose problème — c'est-à-dire le vide se trouvant entre la membrane d'étanchéité et la cavité du toit — en particulier son volume réel (voir fig. 2). Remplie d'isolant fibreux, la cavité du toit possède un volume égal ou supérieur à 95 % de son volume nominal. Avec de l'isolant rigide, le volume réel de la cavité est plus faible, mais il demeure encore élevé. L'importance du volume réel de la cavité est expliquée dans la section sur les cycles barométrique et thermique.

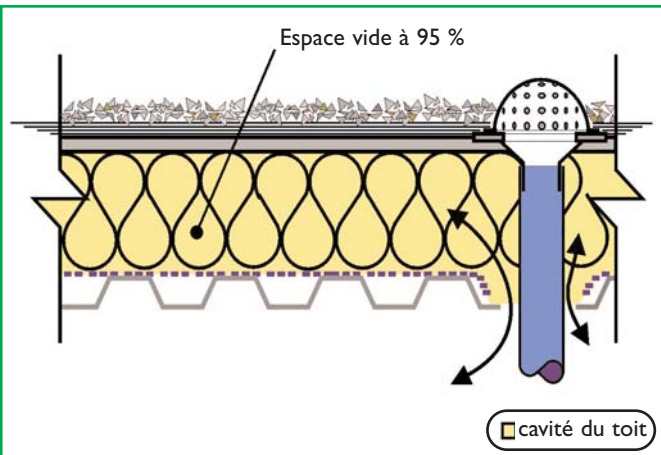


Figure 2—Couverture multicouche

Les fenêtres constituent un cas spécial étant donné qu'elles requièrent une cavité entre leur cadre et le bâti d'attente aménagé dans le mur, de même qu'une lame d'air entre les vitrages isolants scellés. Dans un mur rideau en aluminium courant, des lames d'air sont prévues entre le cadre et les vitrages scellés.

Les effets les plus importants de la pression et des différences de pression se font ressentir sur les matériaux qui créent les cavités dans l'enveloppe du bâtiment. Ces effets se propagent ensuite vers l'extérieur jusqu'au parement et, vers l'intérieur, jusqu'au revêtement de finition. Si les symptômes visibles des problèmes d'enveloppe apparaissent d'abord sur les surfaces extérieures ou intérieures, les dommages les plus importants se produisent généralement dans les cavités cachées du toit et des murs.

Les murs — les panneaux de mur extérieur préfabriqués, les murs rideaux en métal et en verre, les murs extérieurs en maçonnerie, les murs en stucco, les murs comportant un système d'isolation des façades avec enduit (SIFE) de même que les panneaux muraux d'acier ou d'aluminium — contiennent des cavités qui se situent entre les poteaux de l'ossature de bois et d'acier, entre le bardage et le revêtement intermédiaire, dans les parties en surélévation, dans les soffites et dans l'habillage des poteaux (voir fig. 3).

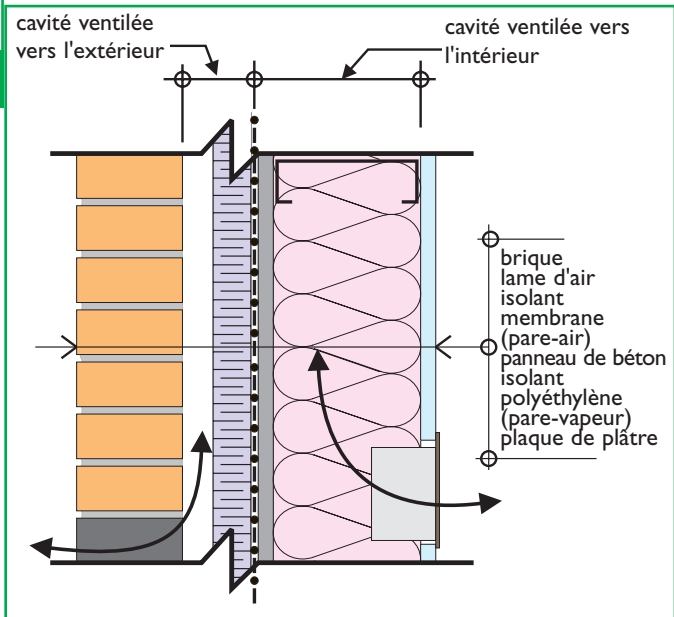
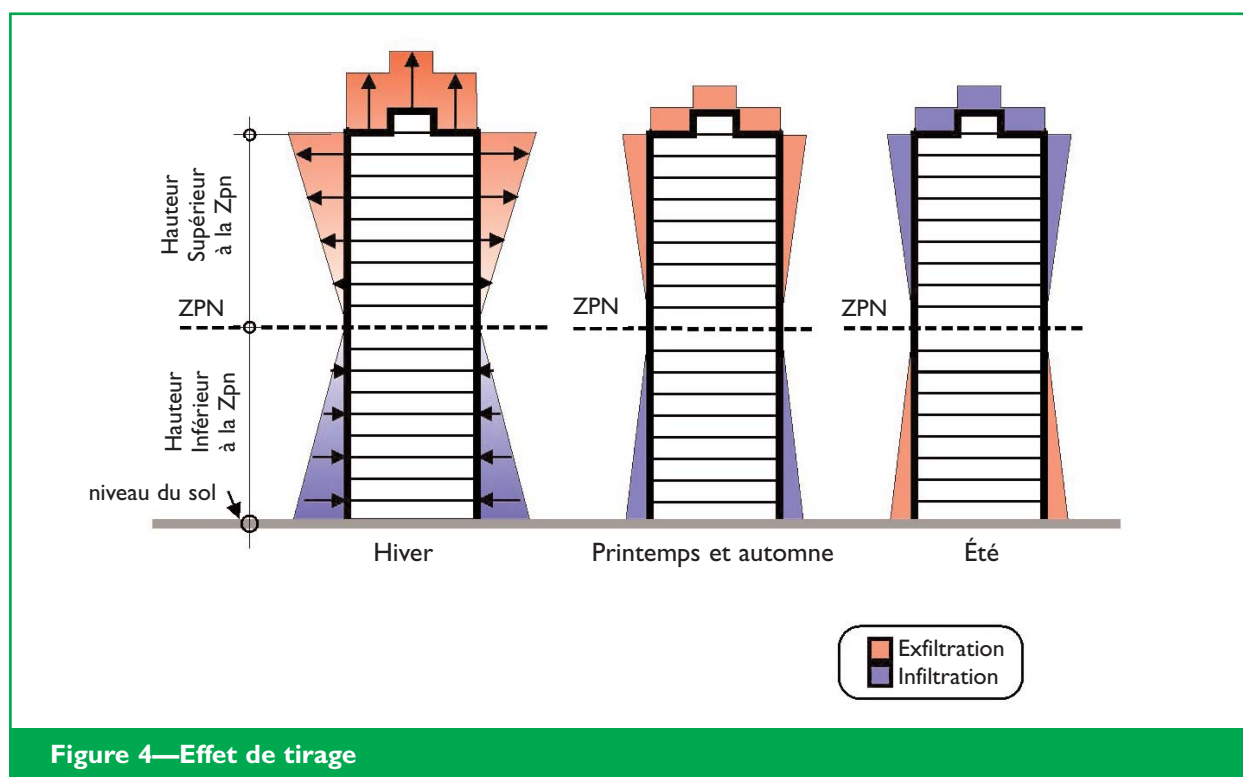


Figure 3—Mur à ossature d'acier et placage de brique

## COMPRENDRE L'EFFET DE TIRAGE

L'effet de tirage est un phénomène provoqué par la température et qu'on remarque surtout par temps froid lorsque l'air chaud intérieur, plus léger que l'air froid extérieur, a tendance à monter dans le bâtiment. Il en résulte une différence de pression d'air entre les environnements intérieur et extérieur au niveau du toit et de la partie supérieure des murs extérieurs. Cette différence de pression fait en sorte que l'air intérieur s'échappe par les fissures et les ouvertures dans les parties supérieures de l'enveloppe du bâtiment, notamment le toit et le haut des murs extérieurs. Pendant que l'air s'échappe au haut du bâtiment, la pression d'air s'inverse à la base de celui-ci. Cette inversion de la pression peut causer une infiltration d'air, ce qu'on appelle l'effet de tirage (ou l'effet de cheminée). La partie du mur extérieur où la différence de pression d'air responsable des infiltrations s'inverse pour causer des exfiltrations s'appelle la zone de pression neutre (ZPN) (voir fig. 4).



À un degré moindre, l'humidité intérieure cause aussi l'ascension ou la descente de l'air étant donné que *l'air humide est plus léger que l'air sec*. Par conséquent, l'air humide monte en raison de sa densité inférieure (le cycle hydrologique), même si sa température est identique à celle de l'air sec. Les sections suivantes portant sur les principes physiques contiennent des explications plus détaillées concernant l'effet de tirage.

L'air intérieur humide et la température extérieure qui se situe en deçà du point de rosée de l'air intérieur peuvent provoquer de la condensation et l'exfiltration de l'air se trouvant dans les cavités de construction ou derrière le parement. Cette condition cause une accumulation de givre ou d'humidité dans les murs en surélévation, la formation de glaçons sur les parements, la corrosion des métaux, la détérioration de la maçonnerie par suite de cycles de gel et de dégel, l'apparition de moisissure dans les murs à ossature de bois et une hausse des coûts énergétiques. Dans le même ordre d'idées, l'air qui s'infiltré par les cavités des murs extérieurs, à la base du bâtiment, peut refroidir les surfaces intérieures en deçà du point de rosée de l'air intérieur. La condensation sur les surfaces intérieures, le gel des canalisations situées dans les cavités murales et le manque de contrôle de la température et de l'humidité intérieures sont les conséquences possibles de cette infiltration.

## Comment établir la différence de pression attribuable à l'effet de tirage

Le lecteur trouvera ci-après les calculs servant à déterminer la différence de pression causée par l'effet de tirage entre les parties intérieure et extérieure des murs ou du toit.

Premièrement, déterminez la hauteur (H) de la partie du bâtiment située au-dessus du niveau du sol.

Deuxièmement, choisissez arbitrairement une hauteur de zone de pression neutre ( $H_{ZPN}$ ) pour la partie du bâtiment située au-dessus du niveau du sol. Habituellement, cette zone se situe un ou deux étages au-dessus du niveau du sol dans le cas des bâtiments multi-étages. Dans le cas d'un bâtiment de faible hauteur, choisissez le niveau du sol comme zone de pression neutre (ZPN).

Troisièmement, choisissez une hauteur donnée au-dessus (ou au-dessous) de la zone de pression neutre comme la zone du toit.

Calculez comme suit la différence de pression au niveau de cette zone<sup>1</sup> :

$$\Delta P_s = d_i g (H - H_{ZPN}) (T_i - T_o) / T_o$$

où  $\Delta P_s$  = la différence de pression attribuable à l'effet de tirage (en Pa),

et  $d_i$  = la densité de l'air intérieur, en  $\text{kg/m}^3$ ,

$g$  = l'accélération due à la pesanteur, soit  $9,81 \text{ m/s}^2$ ,

$H$  = la hauteur de la zone située au-dessus (ou au-dessous) de la ZPN, en m,

$H_{ZPN}$  = la hauteur de la zone de pression neutre, en m,

$T$  = la température absolue, en Kelvins,

$i$  = l'intérieur, et  $o$  = l'extérieur.

Exemple de calcul de l'effet de tirage au haut d'un mur extérieur (et au niveau de la zone du toit) pour un bâtiment de 20 étages et de 60 m (197 pi) de hauteur, dont la zone de pression neutre se situe environ au 4<sup>e</sup> étage ou à 12 m (40 pi) du niveau du sol, par une température hivernale de  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  à l'extérieur et de  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  à l'intérieur :

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= d_i g (H - H_{ZPN}) (T_i - T_o) / T_o \\ &= 1,2 \times 9,81 \times (60 - 12) \times [(273 + 20) - (273 - 20)] / (273 - 20) \\ &= 89 \text{ Pa} \end{aligned}$$

L'emplacement de la zone de pression neutre lorsque la vitesse du vent est nulle dépend des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment — le nombre et la répartition des ouvertures, la résistance des ouvertures aux mouvements d'air et la résistance aux mouvements d'air verticaux à l'intérieur du bâtiment. Si l'on suppose que les ouvertures des murs extérieurs sont réparties uniformément, qu'elles possèdent une résistance égale aux mouvements d'air et qu'il n'existe pas de résistance aux mouvements d'air intérieurs entre les étages, la zone neutre se situera à mi-hauteur du bâtiment.

L'emplacement de la zone de pression neutre n'est pas statique. Le vent et particulièrement la conception et l'utilisation des systèmes de ventilation peuvent déplacer cette zone vers le haut ou vers le bas. Les ingénieurs en mécanique prévoient couramment une légère pressurisation des bâtiments qui peut causer un abaissement de la zone de pression neutre. Cette pressurisation par le système de ventilation vise à réduire l'infiltration d'air extérieur au niveau du vestibule et à mieux contrôler la température intérieure en hiver. Elle réduit aussi le nombre d'étages exposés à des problèmes d'infiltration.

<sup>1</sup> 1997 ASHRAE Handbook Fundamentals, SI Edition, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, Atlanta, GA 30329, tél. : (404) 636-8400, site Web <http://www.ashrae.org>



## **Problèmes causés par l'effet de tirage**

L'effet de tirage se produit dans tous les bâtiments où l'on relève des différences de température. Il est impossible de l'empêcher, de l'éliminer ou de le neutraliser. On peut toutefois le réorienter et même le répartir afin de limiter ses répercussions sur l'enveloppe du bâtiment.

Les conséquences les plus importantes et les plus dommageables se situent au haut des murs extérieurs, dans le toit ou près du niveau du sol.

### Exfiltration d'air au niveau des murs en surélévation

Cette exfiltration peut provoquer l'accumulation de condensation dans les cavités du mur. Elle se traduit par la formation de taches sur les façades qui sont dues à l'humidité ou à la corrosion de même que par l'apparition de givre en hiver. Au printemps, le givre se transforme en eau qui se draine de nouveau vers l'intérieur du bâtiment. L'effet de tirage est aussi reconnu pour causer des problèmes au niveau du sol. Par exemple, il empêche de chauffer adéquatement les pièces des étages situés au-dessous de la ZPN et il provoque le gel des canalisations qui se trouvent dans les cavités des murs extérieurs et les soffites construits au niveau du sol.

L'effet de tirage ne crée pas de différences de pression importantes. La différence de pression type au niveau du toit d'un bâtiment de 10 étages dont la ZPN se trouve à un étage au-dessus du niveau du sol et qui est exposé à une température extérieure de 10 °C est de 38 Pa. L'effet de tirage tire son importance de la différence de pression unidirectionnelle — qui dure des mois en hiver. Cette différence de pression soutenue peut entraîner l'accumulation de quantités importantes d'humidité dans les cavités de même que la déperdition d'énergie. Elle peut aussi causer un certain détachement ou décollement de leur support des matériaux qui constituent le pare-air. Ces matériaux doivent être fixés mécaniquement pour éviter ce genre de défaillance.

### Pressurisation attribuable au système de ventilation

L'effet de tirage est un phénomène causé par la température et on ne peut s'y soustraire. La réduction de l'effet de tirage au niveau du sol par la pressurisation au moyen du système de ventilation d'un bâtiment entraîne une hausse proportionnelle de la différence de pression en partie supérieure de la structure. La pressurisation par système de ventilation est accomplie en augmentant l'air de compensation ou en réduisant l'air évacué. Ce genre de pressurisation peut causer une hausse ou une baisse de la pression dans le bâtiment pouvant atteindre jusqu'à 50 Pa. Comme dans le cas de l'effet de tirage, la pressurisation attribuable au système de ventilation est généralement unidirectionnelle et elle cause souvent des exfiltrations ou des infiltrations inutiles dans l'enveloppe du bâtiment qui se soldent par de nombreux problèmes d'humidité dans les cavités.

### Condensation par temps chaud

L'effet de tirage se produit aussi en été, lorsque les forces motrices inversent les mouvements d'air pour causer des infiltrations dans le toit et la partie supérieure des murs en même temps que des exfiltrations aux niveaux inférieurs. Dans les latitudes sud où la température extérieure demeure chaude et humide pendant de longues périodes, les cavités du toit et des murs extérieurs montrent souvent des traces d'humidité causée par la condensation de l'air extérieur humide sur les revêtements de finition intérieurs (et plus froids) des pièces climatisées. Cette humidité peut entraîner la corrosion prématurée des métaux, la pourriture du bois et l'apparition de divers problèmes de moisissure. Elle est aussi responsable d'une déperdition importante d'air climatisé ainsi que d'une consommation d'énergie élevée.

## Stratégies de conception relatives à l'effet de tirage

Parmi les stratégies de réduction des problèmes associés à l'effet de tirage, on retrouve la limitation des niveaux d'humidité intérieure, l'étanchéisation accrue de l'enveloppe du bâtiment, l'utilisation de portes tournantes ou de sas dans les entrées de même que l'aménagement d'un nombre accru de compartiments hermétiques aux différents étages pour que ces derniers servent de barrières horizontales contre les mouvements d'air verticaux. On a aussi eu recours à la pressurisation ou à la dépressurisation au moyen du système de ventilation, mais cette méthode aggrave autant les problèmes qu'elle ne les atténue. La pressurisation attribuable au système de ventilation est discutée plus en détail dans la prochaine section.

Le fait de prévoir un pare-air de haute qualité pour l'enveloppe du bâtiment constitue une solution d'efficacité moyenne. Dans la présente stratégie de conception, il s'agit surtout de relier ensemble les pare-air du toit et des murs extérieurs, peu importe le type de toit, de débord de toit ou de mur extérieur et peu importe la hauteur du bâtiment. Le pare-air doit être solide et fixé de manière à résister aux charges dues au vent, à l'effet de tirage soutenu et à la pressurisation attribuable au système de ventilation, et ce, pendant toute la durée utile du bâtiment. Dans le cas contraire, cet élément doit être accessible pour en permettre l'entretien et la réparation périodiques. Le pare-air doit être conçu pour résister à ces charges afin d'être conforme aux exigences du code du bâtiment et, ce qui est plus important encore, pour éviter sa défaillance prématurée.

### Comprendre la pressurisation attribuable au système de ventilation

Les systèmes mécaniques continuent de s'améliorer sur le plan de la qualité et ils continuent aussi de fournir une ventilation ainsi qu'une humidification fiables. La combinaison des systèmes de ventilation mécaniques avec la climatisation a aussi encouragé l'utilisation de fenêtres fixes au lieu de fenêtres ouvrantes. En effet, les fenêtres fixes permettent de mieux contrôler l'air ambiant par temps chaud. De plus, on utilise aussi des ventilateurs pour abaisser la ZPN des bâtiments et la rapprocher de l'entrée principale ainsi que des vestibules et réduire ainsi les différences de pression qui s'y produisent (voir fig. 5).

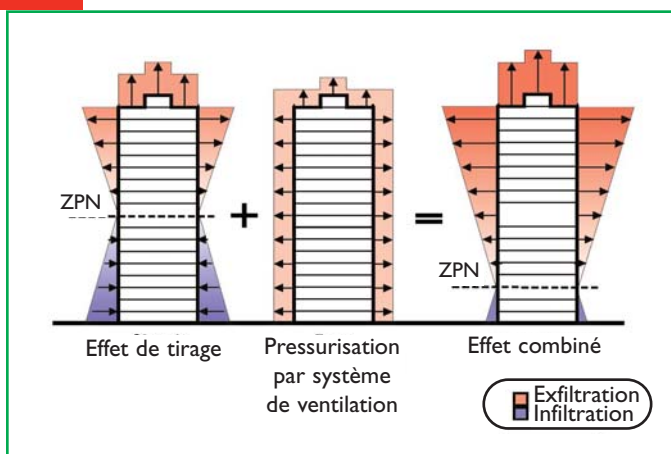


Figure 5—Pressurisation par système de ventilation

La pressurisation attribuable au système de ventilation réglait probablement une multitude de problèmes de performance avant que les bâtiments ne soient isolés et étanchéifiés. Cependant, les bâtiments modernes sont bien isolés et souvent plus étanches à l'air que ceux qui ont été construits il y a 10 ans. Or, l'accroissement de la pressurisation causée par le système de ventilation et l'étanchéité accrue de l'enveloppe du bâtiment se sont traduits par l'apparition d'une nouvelle série de problèmes. On retrouve, entre autres, le surdimensionnement de l'équipement mécanique de chauffage, de climatisation et de ventilation causé par la surestimation des charges de calcul, un phénomène qui s'est soldé par des dépenses en immobilisations inutilement élevées. On retrouve aussi les capteurs de pression hors de portée qui contrôlent mal la pression dans le vestibule des bâtiments et qui nuisent à

la fermeture des portes. De plus, l'utilisation des ventilateurs cause une différence de pression d'air au niveau des murs extérieurs et du toit qui crée un déséquilibre entre l'air admis et l'air extrait, surtout pendant les cycles d'économie d'énergie. Il s'agit d'une caractéristique des systèmes à débit d'air variable qui alimentent les aires des bâtiments. La pressurisation du bâtiment et la ZPN varieront constamment si l'alimentation d'air variable n'est pas asservie à un mécanisme d'extraction lui aussi variable. Cet aspect qui revêt peu d'importance pour un bâtiment mal étanchéifié crée des problèmes sérieux dans le cas d'un bâtiment étanche.

De même, pendant un cycle d'économie d'énergie, le fait de réduire l'air de compensation pendant la nuit sans procéder à une diminution correspondante de l'air évacué crée, dans les murs extérieurs et le toit, une différence de pression négative inutile. Cette différence peut causer des problèmes de contrôle de la température ou de l'humidité, entraîner une hausse des besoins en chauffage ou en climatisation et même être responsable de la formation de condensation sur les cadres de fenêtres.

Toutefois, la surpressurisation d'un bâtiment est, de loin, le problème le plus important causé par les systèmes de ventilation. La surpressurisation augmente l'exfiltration d'air aux points sensibles de l'enveloppe du bâtiment comme le toit, les murs et les fenêtres. En ce qui concerne les bâtiments patrimoniaux, il est particulièrement risqué de les rénover avec du nouvel équipement de ventilation et d'humidification sans appliquer de programme d'amélioration correspondant à l'enveloppe du bâtiment et sans prévoir de flexibilité suffisante dans les commandes de ventilation afin d'ajuster la pressurisation ou la dépressurisation.

### Différence de pression au niveau de l'enveloppe attribuable aux taux de ventilation

La pressurisation de l'enveloppe du bâtiment est le résultat d'un déséquilibre entre l'apport d'air de compensation et l'air évacué du bâtiment. La supériorité du volume d'air de compensation par rapport à celui de l'air évacué du bâtiment crée une différence de taux de ventilation qui accroît la pression dans la structure et cause une exfiltration d'air par les trous de l'enveloppe égale à la différence de taux. La différence de pression au niveau de l'enveloppe du bâtiment sera faible si la surface totale des ouvertures, des trous et des fissures est importante. À l'inverse, la différence de pression sera substantielle si la surface totale des ouvertures, des trous et des fissures est restreinte (voir fig. 6). Les fuites au niveau de l'enveloppe du bâtiment sont généralement involontaires. Toutefois, on arrive à les limiter en respectant soigneusement les normes minimales de construction, puis en procédant à une vérification des travaux. Le lecteur trouvera des renseignements additionnels sur la conception, la construction et la vérification des pare-air dans les articles techniques intitulés *Éléments de conception d'un système d'étanchéité à l'air* et *Lignes directrices concernant la réalisation de systèmes efficaces d'étanchéité à l'air* de la présente série. On utilisera l'équation<sup>2</sup> suivante pour une estimation de la différence de pression dans l'enveloppe du bâtiment fondée sur une vérification des taux de ventilation et des points de fuite :

$$Q = C_d A (2 \Delta P/d)^{0.5} \text{ ou}$$

$$\Delta P = (d/2) \times (Q/(C_d A))^2$$

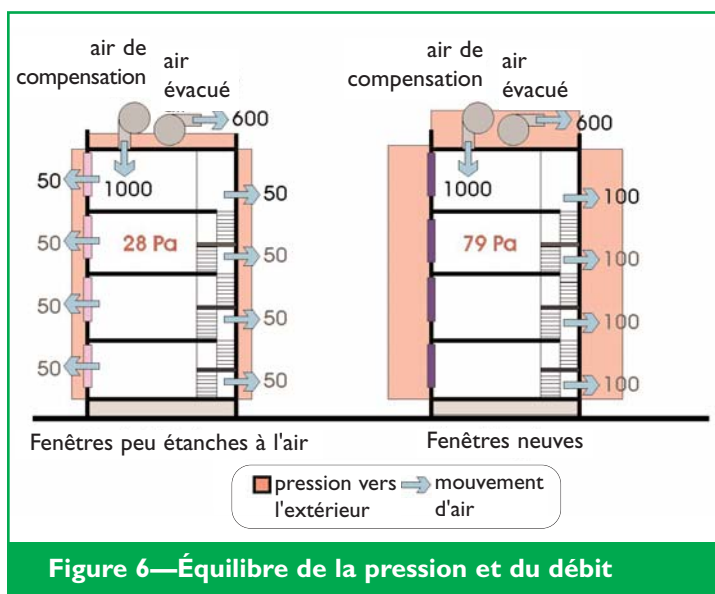
où  $\Delta P$  = la différence de pression au niveau de l'ouverture, en Pa,

$Q$  = le débit d'air, en m<sup>3</sup>/s,

$C_d$  = le coefficient d'extraction de l'ouverture, adimensionnelle (0,6),

$A$  = l'aire transversale de l'ouverture, en m<sup>2</sup>,

et  $d$  = la densité de l'air, en kg/m<sup>3</sup> (environ 1,2 kg/m<sup>3</sup>).



<sup>2</sup> 1997 ASHRAE Handbook Fundamentals, chap.25, p. 11, Airflow through openings.



Supposons qu'un bâtiment de six étages possède un taux d'air de compensation (apport en air frais) de  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $1\ 000 \text{ l/s}$ ) et un taux d'évacuation de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $500 \text{ l/s}$ ). Supposons aussi que la surface de fuite équivalente dans l'enveloppe du bâtiment soit de  $0,1 \text{ m}^2$ . Par conséquent, le taux de fuites d'air ( $Q_f$ ) par les ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment s'établit comme suit :

$$Q_f = \text{l'air compensé/évacué} = 1,0 \text{ m}^3/\text{s} - 0,5 \text{ m}^3/\text{s} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

et la différence de pression dans l'enveloppe du bâtiment se calcule ainsi :

$$\Delta P = (d/2) \times (Q_f / (C_d A))^2$$

$$\Delta P = (1,2/2) \times (0,5 / (0,6 \times 0,1))^2$$

$$\Delta P = 41,6 \text{ Pa}$$

Sur le plan des charges structurales, la différence de pression d'air est faible pour l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment. Cependant, l'écart de pression d'air est important en ce qui concerne l'utilisation du bâtiment, ce qui pourrait causer de nombreux problèmes comme les portes du vestibule qui seront difficiles à fermer, des exfiltrations excessives par les ouvertures, les trous et les fissures qui pourraient provoquer la formation de glaçons sur le parement, l'accumulation d'humidité dans les cavités, la corrosion prématurée des points d'ancrage, l'effritement de la maçonnerie, etc.

Une surface de fuites supérieure dans l'enveloppe du bâtiment, par exemple de  $0,3 \text{ m}^2$ , se traduirait par une différence de pression négligeable, soit de  $4,7 \text{ Pa}$ . C'est ce qui explique la faiblesse des différences de pression attribuables au système de ventilation dans les bâtiments anciens et peu étanches, de même que les grandes différences de pression dans le cas des bâtiments récents et étanches.

Bien que le taux de fuites total ( $Q_f$ ) soit identique dans les deux cas, la surface de fuites répartie est trois fois plus élevée dans le deuxième, ce qui réduit le transfert d'humidité (et la condensation) à un point de fuite quelconque. En revanche, une enveloppe plus serrée provoquerait un transfert d'humidité par les ouvertures restantes deux fois plus élevé, ce qui causerait de la condensation et une détérioration potentielle par l'humidité dans les endroits restés intacts.

La pressurisation causée par le système de ventilation doit être réévaluée pour éviter les problèmes susmentionnés. Le calcul de la ventilation est complexe. On tiendra compte de l'équilibre entre le volume total d'air de compensation et d'air évacué pendant tous les programmes de ventilation prévus, notamment :

- programmes jour-nuit;
- programmes hebdomadaires;
- programmes de week-end;
- programmes saisonniers;
- programmes d'économie d'énergie;
- options de ventilation programmées et manuelles;
- programmes de fonctionnement saisonniers comme le refroidissement libre et le contrôle des taux d'humidité intérieurs — qui sont tous fondés sur les conditions climatiques et les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment.

Pour empêcher la concentration de l'humidité au niveau des ouvertures dans l'enveloppe, il ne s'agit pas de pratiquer davantage de pénétrations dans celle-ci mais bien d'équilibrer les taux de ventilation afin d'obtenir en tout temps une pression neutre ou légèrement positive dans le vestibule. L'augmentation des ouvertures cause une hausse des coûts énergétiques en plus de nuire au contrôle de la température et de l'humidification. Il serait préférable d'installer des commandes adéquates permettant aux propriétaires ainsi qu'aux responsables techniques de régler la pressurisation à son niveau optimum compte tenu des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment et des conditions climatiques de la période de l'année.

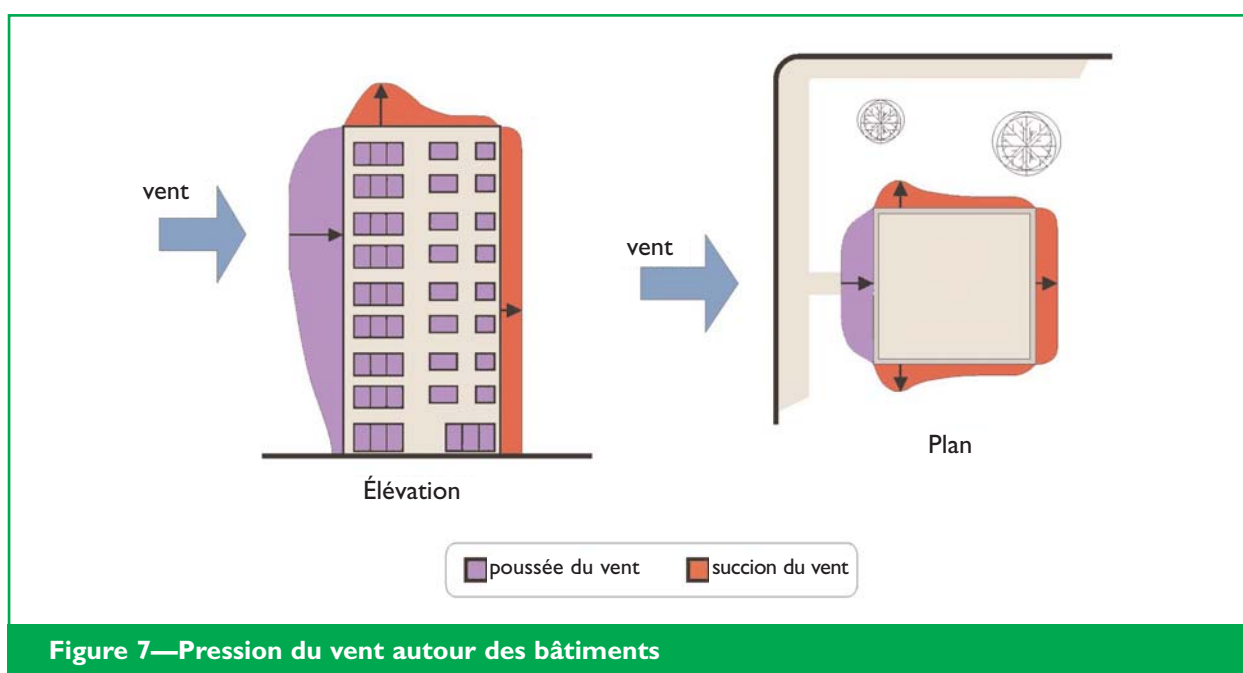
Ensemble, les architectes et les ingénieurs en ventilation devront se pencher davantage sur ces questions. Il faudra peut-être en arriver à des compromis dont l'étanchéisation de l'enveloppe sera toutefois exclue.

### Stratégies de conception de la ventilation

- Équilibrer la ventilation dans tous les bâtiments neufs au niveau du vestibule ou de l'aire la plus près.
- Installer des commandes pour que le responsable technique du bâtiment puisse limiter de façon mécanique les différences de pression induites au niveau des étages non loués. De cette manière, on évitera d'acheminer de l'air sur les étages non loués ou d'en extraire.
- Améliorer le contrôle de l'humidification. À l'intérieur des grands bâtiments, l'humidité est aussi stockée dans les matériaux de construction, ce qui crée une résistance au changement. À l'arrivée du temps froid, il est souvent trop tard pour changer un réglage avant que la condensation n'endommage les surfaces froides. Pour cette raison, il serait utile de programmer un anticipateur qui aurait la capacité de réduire l'humidité stockée de façon graduelle en prévision des chutes de la température extérieure.
- Équilibrer la pression au niveau du vestibule ou de l'aire la plus près et maintenir cet équilibre tout au long des programmes de fonctionnement, y compris les cycles économiseurs d'énergie.

## COMPRENDRE LA PRESSION DU VENT

Lorsque le vent balaie la façade des bâtiments, sa vitesse est brusquement transformée en hausse de pression ou en poussée. La hausse maximum de pression contre la façade sur laquelle le vent souffle s'appelle la *pression de stagnation*. Un bâtiment qui fait obstacle au vent provoquera une hausse de pression sur sa face. Si le vent risque de stagner sur la face du bâtiment contre laquelle il souffle, sa vitesse augmentera probablement sur les côtés et au haut de la structure. La pression sera réduite dans ces parties du bâtiment, ce qui causera une succion ou une aspiration sur la façade du bâtiment (voir fig. 7).



La pression d'air à l'intérieur d'un bâtiment peut augmenter ou baisser à cause de la vitesse du vent et du nombre d'ouvertures dans l'enveloppe ainsi que de leur emplacement. En règle générale, la pression à l'intérieur d'un bâtiment est légèrement inférieure à la pression barométrique ambiante si les ouvertures sont réparties uniformément sur tous les côtés. La différence de pression qui en découle est légèrement accrue du côté exposé au vent et légèrement diminuée sur tous les autres côtés, y compris le toit.

Ces différences de pression provoquent des fuites d'air. Ce phénomène imputable au vent cause des infiltrations d'air du côté exposé au vent, et des fuites d'air sur tous les autres côtés, en l'absence d'effet de tirage ou de pressurisation attribuable au système de ventilation. Les recherches ont démontré que le vent ne constituait pas l'élément moteur principal des fuites d'air, mais qu'il pouvait être responsable d'au plus 25 % du taux de renouvellement d'air sur une base saisonnière. Cependant, la charge structurale est l'aspect le plus important de la pression due au vent. Cette charge qui est habituellement faible peut, à l'occasion, atteindre des valeurs suffisamment élevées pour causer des dommages structuraux au toit, aux murs extérieurs et aux fenêtres. Elle peut aussi endommager les pare-air et déplacer les matériaux qui composent les murs extérieurs. Si la conception de la structure du bâtiment relève d'un ingénieur de structure, l'architecte doit obtenir son apport de même que celui de l'ingénieur en ventilation pour établir les caractéristiques du toit, des murs extérieurs et des fenêtres.

## COMPRENDRE L'EFFET DES CHARGES DUES AU VENT SUR LES BÂTIMENTS

La pression du vent sur une surface est fonction de sa vitesse de même que de la densité de l'air. Il est possible d'établir la pression du vent qui stagne contre la façade d'un bâtiment à l'aide de l'équation suivante<sup>3</sup> :

$$P_w = 1/2 \times dV^2$$

où  $P_w$  = la pression de stagnation du vent, en Pa,  
 $d$  = la densité de l'air, en  $\text{kg/m}^3$ , (environ  $1,2 \text{ kg/m}^3$ ),  
 et  $V$  = la vitesse de l'air, en m/s.

Par exemple, un vent de  $11,1 \text{ m/s}$  ( $40 \text{ km/h}$  ou  $25 \text{ milles à l'heure}$ ) assorti d'une densité d'air de  $1,2 \text{ kg/m}^3$  pourrait se solder par une pression de stagnation de :

$$P_w = \frac{1}{2} \times 1,2 \times (11,1)^2 \\ = 74 \text{ Pa}$$

S'il arrive que les fuites d'air causées par le vent soient importantes, elles demeurent toutefois inférieures à l'effet de tirage ou à la pressurisation attribuable au système de ventilation. Cette situation s'explique par la sporadicité du vent, contrairement au caractère soutenu de l'effet de tirage et de la pressurisation due au système de ventilation en hiver. Or, il importe de tenir compte de charges élevées de pressurisation par le vent pour la conception du pare-air intégré à l'enveloppe du bâtiment. Ainsi, les pare-air doivent être conçus et construits pour résister au calcul de la surcharge due au vent précisé dans la partie 5 du Code national du bâtiment – Canada 1995 (code du bâtiment de l'Ontario 1997).

La pression et les charges dues au vent constituent des facteurs importants pour la sélection des matériaux, des composants et des éléments. Ainsi, le vent cause des fuites d'air moins importantes que l'effet de tirage ou la pressurisation attribuable au système de ventilation, sauf dans le cas des dommages subis par les pare-air trop peu résistants. Le lecteur trouvera des informations additionnelles sur la conception ainsi que la construction de pare-air dans deux articles de la présente série intitulés *Éléments de conception d'un système d'étanchéité à l'air* et *Lignes directrices concernant la réalisation de systèmes efficaces d'étanchéité à l'air*.

<sup>3</sup> 1997 ASHRAE Handbook Fundamentals

## Le calcul des surcharges dues au vent

L'efficacité et la durabilité du pare-air passe par une conception capable de résister aux surcharges dues au vent, tant positives que négatives, tel que défini par le Code national du bâtiment – Canada 1995 pour les parements. Les membranes doivent être supportées; les panneaux et les produits afférents doivent transférer les charges dues au vent par les fixations, et les joints des membranes doivent être fixés mécaniquement et permettre les mouvements.

Le pare-air de l'enveloppe du bâtiment fait partie intégrante de l'écran *pare-pluie*. Ce dernier donne son rendement optimal lorsque le pare-air possède suffisamment de rigidité pour résister aux rafales de vent sans fléchir excessivement.

## COMPRENDRE LA PRESSION BAROMÉTRIQUE

Le changement de pression d'air influe aussi sur l'enveloppe du bâtiment par l'entremise du cycle de pression barométrique qui peut causer l'accumulation d'eau dans les cavités en condensant l'humidité contenue dans l'air. La chute de pression barométrique qui accompagne diverses conditions climatiques provoque aussi une baisse de pression sur les surfaces extérieures des cavités de construction. Une différence de pression se crée entre les surfaces extérieures et l'intérieur des cavités étanches à l'air. Cependant, cette différence de pression provoquera une fuite d'air dans les cavités de construction perméables qui durera jusqu'à ce que la pression se rééquilibre. De même, l'effet opposé se produira si la pression barométrique augmente. De l'air s'infiltrera dans la cavité de construction jusqu'à ce que la pression à l'intérieur de celle-ci soit égale à la pression barométrique.

Or, un problème se pose lorsque la cavité fuit vers l'intérieur du bâtiment plutôt que vers l'extérieur. En hiver, un côté de la cavité est habituellement plus froid que l'autre. L'augmentation de la pression barométrique amène l'air chaud et humide de l'intérieur à s'infiltrer dans la cavité de construction, où il peut se condenser sur les surfaces froides. Lorsque la pression barométrique chute, une petite quantité d'air s'échappe de la cavité en laissant sur ses surfaces froides une faible quantité de condensation. La remontée de la pression renouvelle le cycle et transfère encore plus d'humidité sur les surfaces intérieures de la cavité (voir fig. 8).

Ce phénomène se produit dans toutes les cavités mal scellées. Il a été observé sur le terrain et mesuré en laboratoire. Au cours d'une expérience visant à mesurer l'infiltration d'humidité dans les cavités<sup>4</sup>, on a trouvé que le mouillage des cavités était environ 10 fois plus rapide par le cycle barométrique que par la diffusion de la vapeur à elle seule. Cette constatation ne signifie pas que les pare-vapeur devraient aussi posséder les qualités des pare-air. Elle indique plutôt que la direction de la ventilation de la cavité devrait faciliter son assèchement plutôt que son mouillage, à moins qu'elle ne soit étanche comme dans le cas d'un vitrage isolant. On en conclut que l'emplacement du pare-air requiert un examen plus poussé.

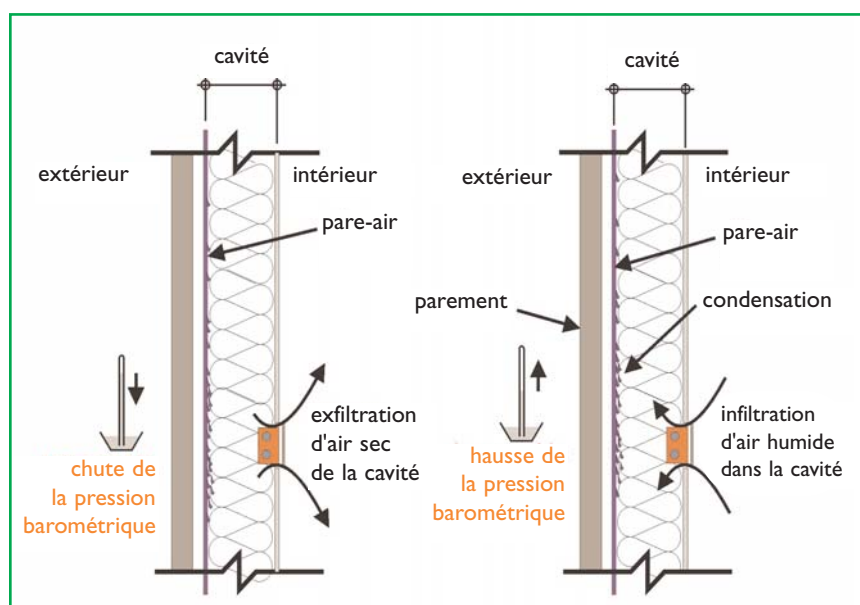


Figure 8—Cycle barométrique

<sup>4</sup> *Causes of condensation moisture in construction cavities.* Il s'agit d'une expérience en laboratoire non publiée portant sur l'effet de tirage, les boucles de convection, la diffusion et le pompage barométrique comme sources de condensation de l'humidité dans les cavités murales. Ces travaux ont été réalisés par l'auteur au début des années 1980.

## **Échange d'air attribuable au cycle barométrique**

Dans l'hypothèse d'une pression barométrique initiale de 103 kPa, une chute à 98 kPa pourrait se traduire par une différence de 5 kPa, ce qui équivaudrait à 100 lb/pi<sup>2</sup>. Toutefois, jusqu'à 5 % de l'air contenu dans une cavité perméable dotée d'un parcours de fuite orienté vers l'intérieur doit s'échapper pour que cette cavité s'équilibre avec la pression barométrique. Cette proportion peut sembler bien minuscule, mais la répétition du phénomène deux fois par jour pendant deux mois peut provoquer jusqu'à six changements d'air complets de même qu'une accumulation d'humidité proportionnelle sous forme de condensation.

On a aussi remarqué que des micro-changements de la pression barométrique d'à peine 50 Pa peuvent se produire jusqu'à 50 fois par heure lorsque le vent secoue un bâtiment. Un cycle de pression de 50 Pa ne représente que 0,05 % de la pression barométrique et, par conséquent, qu'un changement de 0,05 % de la masse d'air de la cavité. Cependant, ce changement peut se solder par un renouvellement d'air de 2,5 % par heure ou de 60 % du volume de la cavité par jour.

Ce phénomène peut être responsable d'un transfert d'humidité important dans les cavités murales. Il pourrait nécessiter le réexamen de nombreuses applications de l'enveloppe du bâtiment, notamment la conception des toits plats traditionnels, des parements de murs extérieurs préfabriqués, des fenêtres à guillotine à double vantail et de divers systèmes d'étanchéisation du parement des façades.

Prenons l'exemple d'un toit plat constitué d'une étanchéité quatre couches, d'un isolant fibreux de 100 mm d'épaisseur, d'un pare-vapeur et d'un recouvrement d'acier. La cavité correspondra à environ 95 % de 100 mm multiplié par la superficie du toit si l'isolant est à 95 % vide.

La membrane imperméable forme un côté de la cavité, et le pare-vapeur (feuille de polyéthylène) l'autre côté. Comme la couverture multicouche constitue un pare-air beaucoup plus résistant qu'un pare-vapeur en feuille de polyéthylène de 0.004 mil d'épaisseur, tout changement de pression dans la cavité provoquera des fuites entre la cavité du toit et l'intérieur du bâtiment. En hiver, de la condensation se formera sur la sous-face de la membrane multicouche, ce qui se traduira ultérieurement par le mouillage de l'isolant du toit, particulièrement autour des avaloirs non scellés à l'endroit où ils pénètrent le pare-vapeur. La condensation est causée par le pompage barométrique d'air humide dans la cavité du toit. Si le mouillage de l'isolant du toit est chose courante, on ne l'a pas encore attribué à d'autres causes qu'une simple fuite dans la couverture. Les architectes doivent garder à l'esprit que ce problème est probablement imputable à d'autres causes que les infiltrations d'eau dans le toit et la condensation reliée aux fuites d'air.

Le cycle barométrique est un phénomène peu connu des professionnels de l'industrie. Il peut provoquer le mouillage et l'assèchement des cavités, selon la période de l'année, les conditions intérieures et l'orientation des ouvertures reliées à la cavité. Une cavité aura tendance à s'assécher si la plupart de ses ouvertures sont reliées à l'extérieur. À l'inverse, une cavité sèche aura tendance à se mouiller en hiver à cause de la condensation si la plupart de ses ouvertures sont reliées à l'intérieur du bâtiment. Le taux de mouillage ou d'assèchement dépend aussi du volume de la cavité et de l'emplacement de ses ouvertures.

### **La prévention des problèmes liés aux cycles barométriques**

Pour éviter le mouillage des cavités par le cycle barométrique, il est préférable de placer le pare-air du côté intérieur de l'isolant de manière à ce que la ventilation des cavités se fasse vers l'extérieur de ce dernier. Dans les cas où cette méthode ne convient pas, le pare-air pourra être placé entre deux couches d'isolant, pourvu qu'il se trouve du côté chaud par rapport au point de rosée.



Enfin, le volume d'air de la cavité doit être réduit entre l'isolant et le pare-air si ce dernier est placé à l'extérieur de l'isolant. On peut aussi utiliser un matériau offrant un taux de perméance à la vapeur d'eau très élevé afin de permettre à l'humidité emprisonnée par les cycles barométriques de se diffuser à l'extérieur.

## COMPRENDRE L'EFFETS DU CYCLE THERMIQUE

Un autre problème attribuable à la pression d'air se produit dans les cavités lorsque la température de l'air qui s'y trouve subit des écarts prononcés. L'écart le plus important se produit habituellement de l'été à l'hiver et inversement. Toutefois, un cycle annuel n'a pas d'effets importants sur le transfert d'humidité dans les cavités.

Un problème beaucoup plus sérieux se répète quotidiennement lorsque le cycle thermique d'une cavité est amplifié par le soleil. Le phénomène a lieu au moment où l'une des surfaces de la cavité est exposée aux radiations du soleil et que sa température s'accroît au-dessus de celle de l'air extérieur, ce qu'on appelle aussi la température *sol-air*. Par exemple, un matin froid où les rayons du soleil levant irradient un parement foncé, la température à la surface du parement peut passer de quelques degrés en deçà de la température extérieure ambiante à un niveau bien supérieur à celle-ci. La différence peut atteindre jusqu'à 40 °C (104 °F) entre la froideur de la nuit et le point le plus chaud de la journée. Ce faisant, l'air dans la cavité augmente aussi de température, parfois de 20 °C (68 °F) ou plus. Or, cette hausse de température dans la cavité provoque ensuite une expansion de l'air qu'elle contient.

Dans le cas d'une cavité de construction hermétique ne permettant aucune expansion, ce dernier phénomène sera converti en hausse de pression qui créera une différence entre les panneaux délimitant le vide. Cependant, les cavités de construction sont rarement hermétiques. L'expansion de l'air qu'elles contiennent provoquera une fuite minuscule. Comme dans le cas du cycle barométrique, la direction de la fuite est ce qui compte le plus. Une fuite vers l'intérieur permettra à l'air de la cavité de s'infiltrer dans le bâtiment et inversement.

Plus tard, lorsque le soleil n'irradie plus le parement, la température à la surface de ce dernier s'abaisse jusqu'à la température extérieure ambiante. La nuit, la chute peut atteindre 40 °C (104 °F) ou plus par rapport au point le plus chaud de la journée. Ce cycle de refroidissement cause une légère contraction du volume d'air contenu par la cavité. En retour, cette contraction attire de l'air de l'intérieur dans la cavité de construction. Le mouillage de la cavité pourrait s'accroître si l'air intérieur est humide, surtout si le cycle se répète jour après jour, en hiver (voir fig. 9).

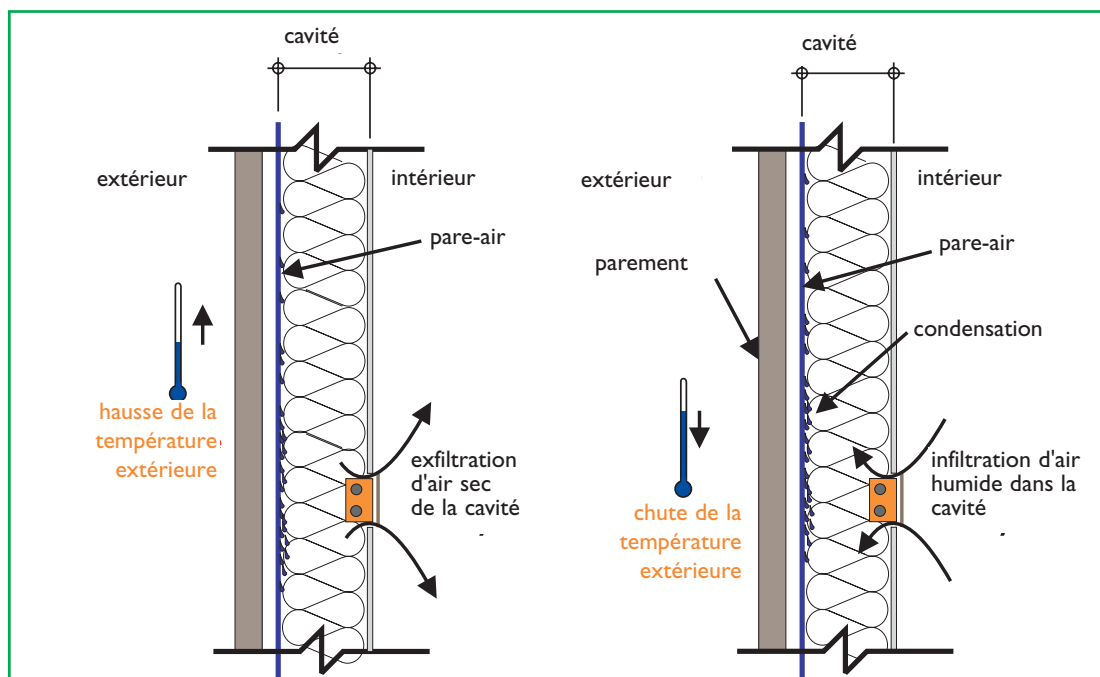


Figure 9—Cycle thermique

## Échange d'air attribuable au cycle thermique

On peut utiliser l'équation  $PV=nRT$  pour mesurer la fuite d'air causée par un changement de température. Une analyse correcte nécessite un changement de masse (fraction molaire) du gaz, mais la méthode d'expansion du volume suivante est simple à appliquer :

Si  $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$  et que  $V_2 = V_1 + \Delta V$ , alors  $\Delta V = (T_2P_1V_1/T_1P_2) - V_1$ .

$P_1$  et  $P_2$  = la pression absolue, en Pa,

$V_1$  et  $V_2$  = le volume, en  $m^3$ ,

$T_1$  et  $T_2$  = la température, en Kelvins,

$\Delta V$  = le changement de volume, en  $m^3$ .

Supposons qu'une unité de volume d'une cavité,  $V_1$ , soit égale à  $1 m^3$ , à une température absolue,  $T_1$  de 263 (273-10) Kelvins qui est aussi égale à  $-10^\circ C$ . Si la température sol-air du parement augmente pour passer de  $T_1 = 263$  Kelvins à  $T_2 = 303$  (273+30) Kelvins, ce qui correspond aussi à  $30^\circ C$ , et que la pression demeure constante de manière à ce que  $P_1 = P_2$ , le changement de volume,  $\Delta V$  de l'air contenu dans la cavité, sera de  $0,15 m^3$  ou de 15 %. Autrement dit, 15 % de l'air contenu dans la cavité sera évacué. De même, le refroidissement de l'air contenu dans la cavité pendant la nuit entraînera une infiltration mesurée qui pourra atteindre 15 % ou plus selon le refroidissement. Encore une fois, cette quantité est minuscule comparativement à l'apport en humidité requis pour créer une condensation importante si un seul cycle se produit.

La température sol-air peut changer rapidement et provoquer plusieurs cycles d'échange d'air lorsque les nuages bloquent temporairement le soleil. Ces changements ont fait l'objet de mesures sur le terrain et peuvent entraîner un échange de la masse d'air dans la cavité susceptible d'atteindre jusqu'à un volume complet au cours de sept cycles ou moins de réchauffement et de refroidissement. La portée du changement de température et la durée de chaque cycle déterminent, en hiver, s'il y aura un mouillage ou un assèchement important.

Ce phénomène de réchauffement peut se produire dans de nombreux types de cavités de construction. Toutefois, on pense qu'il est plus important dans les toits inclinés ou plats, les murs extérieurs revêtus de parement en métal, en plastique ou en panneaux cimentaires minces de même que les vitrages isolants fissurés ou endommagés.

La fissuration ou la détérioration d'un vitrage isolant présente un exemple des effets de ce phénomène. Il n'est pas rare, lorsque le vitrage intérieur se fissure, que la lame d'air qui le sépare du vitrage extérieur se remplit partiellement de condensation. En effet, le réchauffement de l'air sec de la lame par le soleil provoque son expansion de même que son infiltration dans l'air intérieur. Lorsque la lame refroidit, l'air intérieur humide s'infiltrera entre les deux vitrages pour en augmenter la teneur en eau. Une chute de la température extérieure en deçà du point de rosée de la lame d'air causera la formation de gouttes d'eau ou de traînées de condensation sur la surface interne du vitrage extérieur. Cette eau s'accumulera ensuite au bas du vitrage isolant.

À l'inverse, si la fissure dans le vitrage isolant se trouve du côté extérieur, l'air de la lame s'échappera à l'extérieur pendant son réchauffement et l'air extérieur s'infiltrera entre les deux vitrages pendant un refroidissement. L'air extérieur étant sec, le potentiel de condensation est moins élevé. Malgré tout, le vitrage finira par devenir inutilisable à force de s'empoussiérer et de s'embrouiller.

Dans les latitudes nord, le cycle thermique provoque l'apparition de problèmes d'humidité dans bien des cavités de l'enveloppe du bâtiment. Dans les latitudes sud, le phénomène est inversé parce que l'air extérieur est chaud et humide pendant de longues périodes et qu'il se condense dans les cavités de construction. On doit tenir compte de ce phénomène si l'on veut concevoir une enveloppe de qualité à cause des problèmes d'humidité qu'il peut engendrer. De même, on peut se servir du cycle thermique pour assécher les cavités si les orifices de ventilation sont dirigés vers l'extérieur comme dans le cas de l'écran pare-pluie et de la toiture inversée.

## Conception en fonction du cycle thermique

Les recommandations relatives au cycle thermique s'apparentent à celles du cycle barométrique, sauf qu'il est possible de réduire la température sol-air des surfaces en employant des couleurs pâles ou des parements extérieurs plus massifs ayant une capacité accrue de stockage thermique.

## LE CONCEPT DE LA ZONE TAMPON DYNAMIQUE

De nos jours, on emploie couramment des installations mécaniques pour augmenter le taux d'humidité intérieure et pressuriser tous les bâtiments publics. Cette pratique convient aussi aux bâtiments existants que l'on remet à neuf ou qu'on améliore, ce qui comprend de nombreux bâtiments patrimoniaux. Malheureusement, on a relevé que la plupart des bâtiments de cette dernière catégorie ne pouvaient supporter des taux d'humidité intérieure élevés sans une intervention majeure visant à protéger leurs murs existants, habituellement faits de maçonnerie, des dommages causés par l'humidité. Il faut donc étanchéifier presque parfaitement les murs extérieurs en procédant du côté intérieur pour prévenir la transmission de l'humidité intérieure dans la maçonnerie ancienne par l'entremise des fuites d'air. Encore une fois, il est malheureux que les progrès dans le domaine de l'étanchéisation de l'enveloppe du bâtiment n'aient pas atteint un niveau suffisamment élevé pour empêcher les infiltrations d'air d'endommager les murs en maçonnerie des bâtiments patrimoniaux.

On a donc cherché une autre méthode pour limiter ou prévenir la condensation dans les cavités de construction, particulièrement celles qui avaient un caractère patrimonial. Un chercheur aujourd'hui décédé du Conseil national de recherches du Canada, Kirby Garden, avait élaboré une stratégie de ventilation des cavités de construction avec de l'air partiellement réchauffé afin de prévenir la condensation. Bien que la méthode ait été utilisée à quelques occasions, elle ne s'est révélée efficace que pour certaines applications seulement.

Dans le but d'améliorer le concept original, l'auteur avait élaboré le concept de la zone tampon dynamique (ZTD) avec l'aide de Michel Perrault, un consultant en enveloppe du bâtiment qui est lui aussi décédé. Essentiellement, le concept consistait à employer de l'équipement de ventilation pour accroître la pression dans une cavité murale extérieure ou un toit et à inverser l'orientation de la pression pour qu'elle s'exerce, la plupart du temps, de la cavité vers le revêtement de finition intérieur. Le renversement de direction de la différence de pression inverse aussi le mouvement des fuites qui se produisent par les petites ouvertures, les fissures et les trous.

Cette méthode ne ventile pas une cavité; tout au plus, elle la pressurise davantage que les aires intérieures afin d'empêcher l'exfiltration d'air intérieur dans la cavité. Elle s'est révélée beaucoup plus efficace que le concept de ventilation original et moitié moins cher à mettre en œuvre (voir fig. 10). Au cours des cinq dernières années, elle a été appliquée dans plus de 15 bâtiments au Canada. Elle a été jugée efficace dans tous les cas. Parmi les bâtiments modifiés, mentionnons celui de la Canada-Vie, à Toronto (un vieux bâtiment), l'Édifice commémoratif de l'Est, à Ottawa, l'hôpital Alexandria, à Edmontréal pour ne nommer que ceux-là.

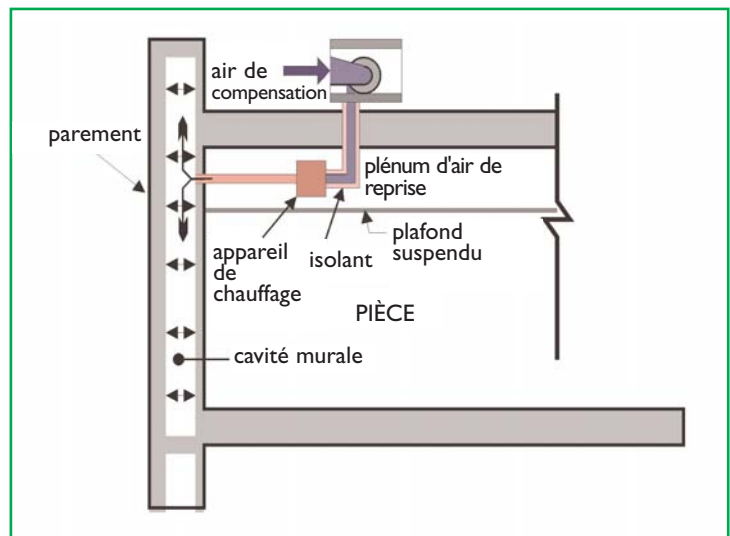


Figure 10—Application type de la pression dans une zone tampon dynamique

De 1994 à 1996, les Services d'architecture et de génie de Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) ont financé une recherche appliquée sur la technologie de la ZTD. Au terme de ces travaux, on a établi, dans le cas de nombreux types de cavités de construction faisant partie de murs extérieurs en maçonnerie, que le système de ZTD devait fournir seulement de 14 à 24 l/s (de 30 à 50 pi<sup>3</sup>/min) d'air pour un mur extérieur de 9,3 m<sup>2</sup> (100 pi<sup>2</sup>) de surface. Si la cavité de la ZTD à pressuriser est située à l'extérieur de l'isolant, il suffit de préchauffer l'air extérieur d'environ 10 °C. Si la cavité de la ZTD se trouve du côté chaud de l'isolant, l'air qu'elle contient doit être chauffé jusqu'à une température inférieure de 5 °C environ à la température ambiante intérieure. La puissance du ventilateur ne doit pas excéder 0,5 po de colonne d'eau de pression de stagnation. Dans la plupart des applications, il s'agit de la différence de pression maximum requise du système de pressurisation par ventilateur de la ZTD. Cependant, le ventilateur de pressurisation doit être doté d'une commande à vitesse variable étant donné les fluctuations d'étanchéité des cavités murales.

Dans la plupart des régions du Canada, le système de ZTD doit fonctionner continuellement du 5 octobre au 15 mai environ. L'étude de TPSGC a révélé que les coûts énergétiques étaient négligeables ou nuls après avoir tenu compte des économies d'énergie attribuables à la réduction des fuites. Le système n'est pas employé l'été, que le bâtiment soit climatisé ou non.

L'application du concept de pressurisation de la ZTD requiert un vide ou une cavité dans le toit ou un mur extérieur où l'on injectera de l'air extérieur préchauffé afin de le pressuriser. Cette approche ne nécessite pas l'étanchéisation parfaite de la cavité murale : il suffit d'obstruer les trous les plus importants dans les revêtements intérieurs de finition. Il faut couvrir ou sceller tous les trous dont le diamètre excède celui d'un crayon. De plus, la cavité n'a pas besoin d'être entièrement ouverte ou libre étant donné que la pressurisation de la ZTD ne tient pas compte de la résistance à l'écoulement et qu'elle ne requiert pas la pose de conduit de reprise ou d'évacuation dans l'élément. L'aspect le plus important consiste à fermer et à sceller toutes les chantepleures et tous les orifices de ventilation extérieurs du parement.

Un système de ZTD n'est contrôlé que par la pression. L'air extérieur est acheminé dans la cavité de la ZTD jusqu'à ce que la pression se situe entre 5 et 10 Pa au-dessus de la pression ambiante dans le bâtiment ou jusqu'à ce que le ventilateur atteigne sa puissance maximale. Peu importe la pression causée par l'effet de tirage dans le bâtiment, le système de contrôle du ventilateur maintient une pression d'air adéquate dans la cavité. La pression supérieure dans la cavité murale extérieure empêche l'air intérieur humide de s'y infiltrer de même que l'apparition de problèmes de condensation.

Le concept de la ZTD comporte un autre avantage : ce système permet d'assécher une cavité moins de 48 heures après qu'une pluie prolongée ait mouillé un mur de maçonnerie.

### **Quand utiliser le système de ZTD**

Une étude de TPSGC sur la ZTD réalisée dans l'Édifice commémoratif de l'Ouest, à Ottawa, a révélé que l'application du système de pression de la ZTD était plus efficace que le meilleur pare-air pour les bâtiments patrimoniaux construits en région froide et ayant un taux d'humidité intérieur élevé. En effet, la différence de pression inversée empêche l'air intérieur de s'infiltrer dans la cavité. Elle agit comme un pare-air parfait et compense les erreurs et les omissions mineures au chapitre de la conception de même que les défauts de construction. De plus, elle coûte environ moitié moins cher qu'une modernisation du pare-air d'efficacité égale. L'interruption du système afin de l'entretenir ou de le réparer a été le seul moment où il ne donnait pas un rendement adéquat. En langage clair, le système de ZTD agit pratiquement comme un pare-air parfait. Ce système de pressurisation contrebalance l'effet de tirage et les variations de pression au niveau de la ventilation.

- La modernisation des bâtiments patrimoniaux pour y poser un pare-air est à la fois destructrice et rarement efficace lorsque les structures sont humidifiées et pressurisées. On recommande plutôt d'installer un système de ZTD dans ce cas-ci.
- Le concept de la ZTD s'applique aussi aux bâtiments neufs qui requièrent un contrôle accru du taux d'humidité intérieur comme les hôpitaux, les musées et les bâtiments industriels très humides.
- Le concept de la ZTD s'applique à des parties de l'enveloppe du bâtiment comme le toit ou un seul mur extérieur, le cas échéant. Par exemple, on peut s'en servir pour les murs en surélévation, les soffites situés au niveau du sol, les colonnes, les allèges ainsi que d'autres applications limitées.

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'application de la science et de la technologie à la conception de l'enveloppe du bâtiment continue de s'étendre. Plusieurs questions ont été abordées dans les recherches et les publications précédentes :

- la condensation par le contrôle de la diffusion grâce à l'utilisation de pare vapeur;
- la condensation par le contrôle des fuites d'air et les pare-vapeur;
- l'économie d'énergie par le contrôle de la déperdition thermique et l'isolant;
- le contrôle de l'infiltration de la pluie par l'application du principe de l'écran pare-pluie.

Il reste des points à aborder qui sont tout aussi importants, sinon davantage, comme la pression de l'air et le contrôle de la différence de pression d'air. Ces aspects ont toujours été cruciaux pour le calcul des charges dues au vent. Toutefois, le temps est venu de les étendre à la conception de l'enveloppe du bâtiment si l'on veut continuer d'en améliorer la performance et la durabilité. Il importe aussi de comprendre ces phénomènes pour que les applications soient conçues correctement et trouver des façons novatrices et efficaces d'accroître la qualité des enveloppes. En résumé, nous soumettons au lecteur les conclusions et les recommandations suivantes :

1. Il faut tenir compte des cycles de pression et de la différence de pression d'air lors de la conception d'une enveloppe de bâtiment.
2. Pour mieux comprendre les effets des cycles barométrique et thermique, on recommande d'appliquer les modèles de calcul simples présentés dans ce document aux modèles de simulation de l'humidité afin d'aider les concepteurs à prédire l'importance du phénomène avec diverses applications. Les concepteurs n'ont pas à maîtriser les calculs susmentionnés. Il leur suffit plutôt de connaître le modèle requis s'ils doivent estimer l'accumulation d'humidité.
3. En règle générale, les cavités de construction des bâtiments exposés au climat canadien devraient toutes se ventiler vers l'extérieur.
4. Les recommandations de pressurisation attribuable au système de ventilation de l'ASHRAE doivent être revues le plus tôt possible. Les recommandations actuelles de l'organisme pour la pressurisation des bâtiments causent probablement des problèmes d'humidité au niveau de l'enveloppe.
5. La conception des pare-air n'est pas encore entièrement maîtrisée par les architectes. On n'insistera jamais assez sur la nécessité de concevoir des pare-air qui résistent aux pressions de pointe et aux pressions soutenues. Il faut aussi que les fuites du pare-air n'excèdent pas les maximums précisés par le code du bâtiment en vigueur.



6. L'effet de tirage ne peut être éliminé. Dans les immeubles de grande hauteur, le contrôle des fuites d'air causées par l'effet de tirage est inadéquat. Même s'il n'est que légèrement humide, l'air intérieur causera des problèmes d'humidité et de condensation dans l'enveloppe du bâtiment. On recommande de pousser davantage la recherche sur l'amélioration de la conception de l'enveloppe et, en particulier, du pare-air.

Les cycles barométrique et thermique des cavités de l'enveloppe sont peu connus et bien mal compris. Si les aspects fondamentaux de la physique sont très élaborés, leur application nécessitera des recherches plus approfondies afin de réduire la détérioration causée aux bâtiments par l'humidité.

## BIBLIOGRAPHIE

BUILDING SCIENCE FOR A COLD CLIMATE. Neil B. Hutcheon et Gustav Handegord, Conseil national de recherches Canada, imprimé par la John Deyell Company, © 1983, 1989. ISBN 0-9694366-0-2.

DIGESTE DE LA CONSTRUCTION AU CANADA. En trois volumes, CBD 1-100, 101-150 et 151-200, publié par l'Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Ontario), 1960-1985.

## QUESTIONS

1. Nommez quatre problèmes causés couramment par la pression de l'effet de tirage dans un bâtiment de moyenne hauteur.
2. Si la température intérieure est de 22 °C et que la température extérieure est de -15 °C, quelle sera la pression de l'effet de tirage au niveau du toit et du sol pour un bâtiment de 24 m de haut, de huit étages, et dont la zone de pression neutre se situe à 5 m au-dessus du niveau du sol?
3. Quel est le coefficient de pression interne en terme de pression de calcul du vent?
4. Quelle est la pression de stagnation d'un vent de 80 km/h?
5. Quelle est l'importance de la pression de calcul du vent pour la conception d'un pare-air?
6. Quelle est la pression barométrique à une altitude de 5 km au-dessus du niveau de la mer?
7. Est-ce que l'air entre ou sort de la cavité lorsque la pression barométrique augmente?
8. Dans un climat froid, où doit-on placer le pare-air pour minimiser les effets négatifs du pompage barométrique?
9. Quelle est la cause des cycles thermiques fréquents?
10. Pour minimiser les effets du cycle thermique dans les cavités du toit, est-il préférable d'exiger une couverture traditionnelle ou une toiture inversée?
11. Quels sont les deux styles de systèmes de ventilation de la cavité au moyen d'un ventilateur?
12. Quel paramètre sert à contrôler la vitesse de ventilateur d'un système de ZTD?