

MESURE DE L'ÉTANCHEITÉ À L'AIR DES BÂTIMENTS DE GRANDE HAUTEUR : QUELQUES LIGNES DIRECTRICES

Auteurs : Nolwenn Hurel et Valérie Leprince (PLEIAQ) pour l'asbl BCCA

Décembre 2021

1 QUEL EST LE PROBLÈME LORSQUE L'ON TESTE DES BÂTIMENTS DE GRANDE HAUTEUR ?

Pour un test idéal d'étanchéité à l'air d'un bâtiment, la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur serait constante dans le temps et uniforme le long de toute l'enveloppe du bâtiment, de sorte que chaque fuite soit également prise en compte et que les résultats du test ne dépendent pas des conditions de test.

En raison de l'effet de cheminée et éventuellement de la perte de pression dans les cages d'escalier, il n'est généralement pas possible, dans les bâtiments de grande hauteur, d'obtenir une différence de pression uniforme le long de l'enveloppe du bâtiment, comme expliqué ci-dessous.

Le vent constitue également un obstacle majeur, car il est généralement instable et crée une surpression sur les façades extérieures exposées au vent et une sous-pression sur les façades extérieures abritées du vent. C'est pourquoi il est recommandé de tester la perméabilité à l'air d'un bâtiment dans des conditions de vent calme. La vitesse du vent augmentant généralement avec la hauteur par rapport au sol, le problème de la pression du vent et de son instabilité peut être plus prononcé pour les bâtiments de grande hauteur, mais ce problème n'est pas spécifique pour les bâtiments de grande hauteur, et n'est donc pas abordé plus avant dans ce document.

Remarque : il n'existe pas de définition stricte de la hauteur minimale d'un bâtiment "de grande hauteur". Dans le contexte du test d'étanchéité à l'air, la hauteur pour laquelle des problèmes se poseront dépend de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. La norme ISO 9972¹ estime que pour une $H \cdot \Delta T$ supérieure à 250m.K" il est peu probable qu'une différence de pression à débit nul satisfaisante puisse être obtenue".

1.1 L'EFFET DE CHEMINÉE

L'effet de cheminée est la différence de pression due à une différence de température (et donc de densité de l'air) entre l'intérieur et l'extérieur, qui peut induire des mouvements d'air dans les bâtiments par des ouvertures ou des fuites.

Comme le montre la Figure 1, la pression de l'air diminue avec la hauteur. Si l'air à l'intérieur du bâtiment est à la même température qu'à l'extérieur ($T_{\text{ext}}=T_{\text{int}}$), la pression diminue de la même façon à l'intérieur et à

¹ ISO 9972:2015 Performance thermique des bâtiments — Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments — Méthode de pressurisation par ventilateur

l'extérieur et donc la différence de pression reste nulle le long de l'enveloppe. En revanche, lorsque la température n'est pas la même, la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur varie avec la hauteur.

Si l'on prend l'exemple des conditions hivernales ($T_{ext} < T_{int}$), la densité de l'air intérieur est inférieure à celle de l'air extérieur, ce qui fait que l'air chauffé monte et s'échappe par le haut, créant une surpression au dernier étage et une sous-pression au rez-de-chaussée où l'air froid s'infiltré.

Idéalement, le test d'étanchéité à l'air devrait être réalisé dans des conditions de températures intérieure et extérieure similaires (en mi-saison, pendant la nuit pour éviter le rayonnement solaire), mais en raison de multiples contraintes, il est difficilement possible d'annuler cet effet de cheminée.

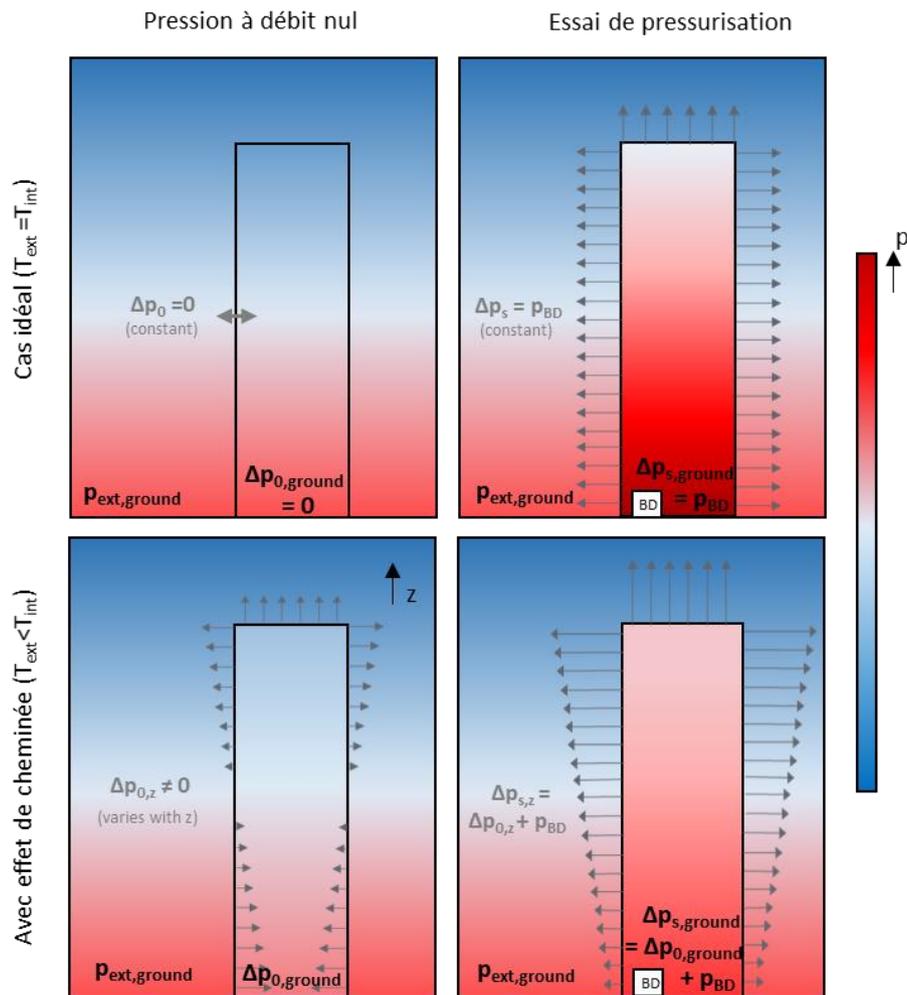


Figure 1 - Impact de l'effet de cheminée pour les essais de pressurisation sur les bâtiments de grande hauteur (avec l'exemple de fuites d'air uniformément réparties le long de la hauteur du bâtiment)

La variation de la différence de pression entre le haut et le bas d'un bâtiment due à l'effet de cheminée (Δp_{stack}) est donnée par:

$$\Delta p_{stack} = -(\rho_{int} - \rho_{ext})gH \quad (1)$$

Comme :

$$p_{int,H} - p_{ext,H} = p_{int,ground} - p_{ext,ground} - (\rho_{int} - \rho_{ext})gH \quad (2)$$

Avec :

- $p_{int,z}$ la pression à l'intérieur du bâtiment à la hauteur z (Pa)
- $p_{ext,z}$ la pression extérieure à la hauteur z (Pa)
- H la hauteur du bâtiment (m)
- g l'accélération gravitationnelle (m/s^2)
- $\rho_{int} - \rho_{ext}$ la différence de densité entre l'air interne et externe due à la différence de température:

$$\rho_{int} - \rho_{ext} = \rho_0 \left(\frac{273}{273 + T_{int}} - \frac{273}{273 + T_{ext}} \right) \quad (3)$$

Avec :

- ρ_0 la densité de l'air à 0°C (1.293 kg/m^3 à P_{atm})
- T_{int} la température de l'air interne (°C)
- T_{ext} la température de l'air externe (°C)

La formule (1) est souvent approximée comme suit :

$$\Delta p_{stack} \approx 0.043 \times H \times (T_{int} - T_{ext}) \quad (4)$$

Dans la Figure 2, cette approximation est utilisée pour estimer la différence de pression entre le haut et le bas du bâtiment (Δp_{stack}) en fonction de la différence de température et de la hauteur du bâtiment.

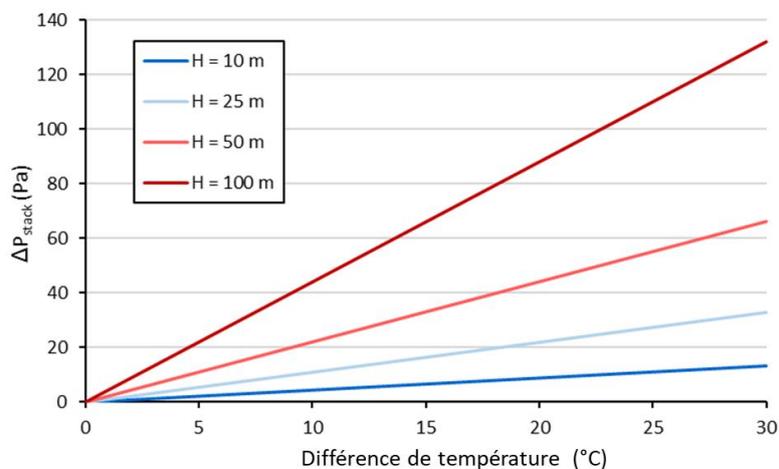


Figure 2 – Variation de la différence de pression due à l'effet de cheminée entre le haut et le bas d'un bâtiment en fonction de sa hauteur et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Pour des fuites d'air uniformément réparties sur la hauteur du bâtiment, le point de pression neutre (pour lequel $p_{ext} = p_{int}$) se situera à la moitié de la hauteur du bâtiment, comme le montre la Figure 3. Dans cette configuration spécifique, la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur sera de la même ampleur en haut et en bas du bâtiment, mais de signes opposés. Et la différence de pression à débit nul mesurée au rez-de-chaussée $\Delta p_{0,ground}$ sera la moitié de Δp_{stack} .

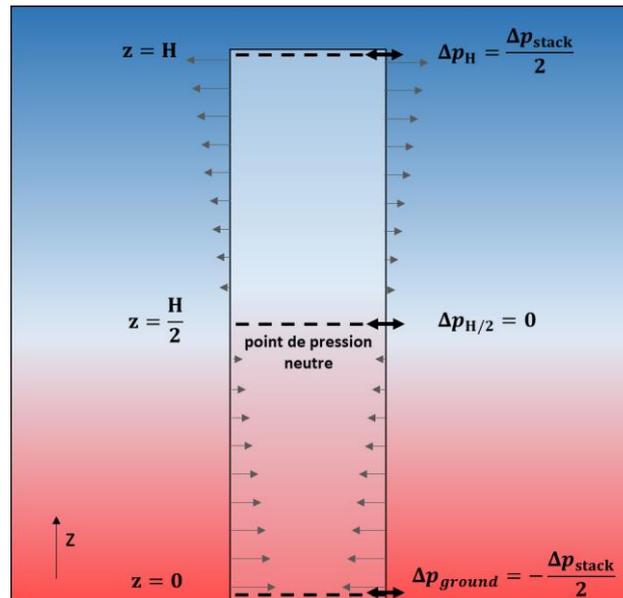


Figure 3 – Effet de cheminée en cas de fuites uniformément réparties sur la hauteur du bâtiment.

1.2 LA PERTE DE PRESSION A TRAVERS LA CAGE D'ESCALIER ET LA CIRCULATION

Lorsqu'un bâtiment est pressurisé à partir du rez-de-chaussée, les obstacles sur le chemin des étages supérieurs (et loin du ventilateur en général) empêchent la pression de s'homogénéiser à l'intérieur du bâtiment. Par conséquent, même sans l'effet de cheminée, la différence de pression peut diminuer le long de l'enveloppe du bâtiment (en s'éloignant du ventilateur) comme le montre la Figure 4. Plus le bâtiment est étanche, plus la perte de pression interne est importante puisqu'elle varie avec le carré du débit pour un flux turbulent.

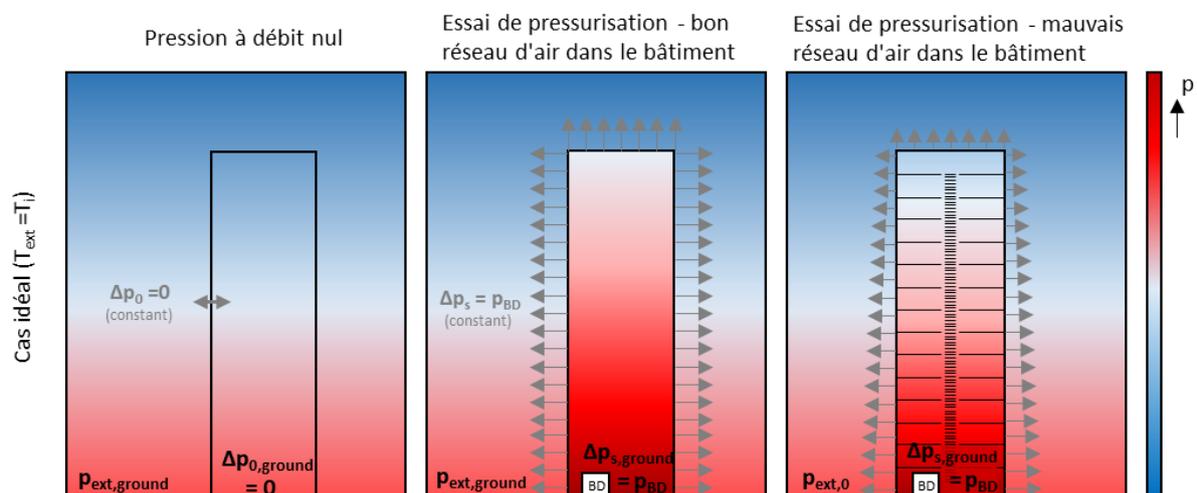


Figure 4 - Impact des obstacles pour les essais de pressurisation sur les bâtiments de grande hauteur (beaucoup d'obstacles pour le flux génèrent un mauvais réseau d'air dans les bâtiments)

2 PROBLEMES LIES AUX TS-P 71-3 (ET A LA NORME L'ISO 9972)

Cette spécificité des bâtiments de grande hauteur est en contradiction avec plusieurs points des STS-P 71-3² (et de la norme internationale ISO 9972³) pour la détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments par la méthode du ventilateur:

- 1) Selon la norme, les moyennes des mesures de pression positive, négative et de toutes les pressions naturelles à zéro ($\Delta p_{0,ground}$) doivent être inférieures à 5 Pa. Pour les bâtiments de faible hauteur, cela permet d'éviter les mesures sous des vents forts ou un fort effet de cheminée. Cette exigence peut toutefois difficilement être satisfaite dans les bâtiments de grande hauteur, comme l'illustre la Figure 3. En prenant l'exemple d'un bâtiment de 50 m de haut avec une distribution uniforme des fuites, une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de 4.7°C est suffisante pour induire $|\Delta p_{0,ground}| = 0.043 * 50 * 4.7 / 2 = 5$ Pa. Lorsque le bâtiment a un volume supérieur ou égal à 4000 m³, les STS-P 71-3 §5.9.1 décrivent quelques exceptions à ce critère. Cependant, même dans ce cas, il est conseillé de mesurer lorsque l'effet du vent et l'effet de cheminée sont limités.
- 2) Selon la norme, cinq fois la pression naturelle de débit nul ($\Delta p_{0,ground}$) est requise pour le point de pression le plus bas de la série de mesures d'étanchéité à l'air. Les bâtiments de grande hauteur étant souvent des bâtiments de grand volume, cela peut être difficile à réaliser avec les équipements de test standard. D'autant plus que, comme mentionné ci-dessus, $|\Delta p_{0,ground}|$ est souvent bien supérieur à 5 Pa. L'exemple d'un bâtiment de 50 m de haut avec une distribution uniforme des fuites, testé avec une température extérieure de 0°C et une température intérieure de 15°C nécessiterait un premier point de mesure supérieur à 82 Pa ($\Delta p_{0,ground} = -16.5$ Pa). Par conséquent, le STS-P 71-3 §5.9.1 limite ce point de mesure le plus bas à 40 Pa pour les bâtiments d'un volume supérieur ou égal à 4000 m³. Le point de mesure le plus élevé doit alors être supérieur d'au moins 25 Pa au point le plus bas. Mais même ainsi, les pressions requises dans le bâtiment sont beaucoup plus élevées que pour les faibles $|\Delta p_{0,ground}|$.
- 3) La norme stipule dans §5.2.4 que "L'ensemble du bâtiment ou la partie du bâtiment à tester doit être configuré pour répondre à la pressurisation comme une seule zone. Toutes les ouvertures d'interconnexion (porte, trappe, etc.) dans la partie du bâtiment à tester doivent être ouvertes." Pour les bâtiments de grande hauteur avec de longs couloirs et cages d'escalier, c'est un défi comme pour tout grand bâtiment. C'est d'autant plus difficile pour les bâtiments très étanches que la perte de pression peut être proportionnelle au carré du débit (pour un flux turbulent).

3 CONSEILS PRATIQUES

La première priorité lorsqu'on teste la perméabilité à l'air d'un bâtiment de grande hauteur est de se conformer aux STS-P 71-3. Comme nous l'avons vu plus haut, deux exigences peuvent cependant être difficiles à atteindre:

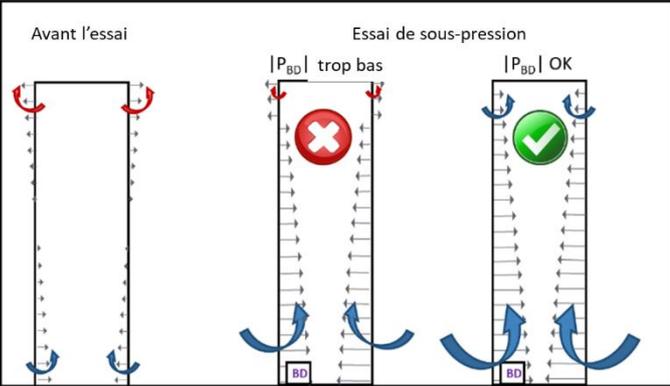
- Sur la pression à débit nul (au rez-de-chaussée): $\Delta p_{0,ground} < 5$ Pa (ou le plus bas possible pour un bâtiment avec un volume supérieur ou égal à 4000 m³).
- Sur le premier point de pression (au rez-de-chaussée): $\Delta p_{s,ground} > 5 * \Delta p_{0,ground}$ (ou ≥ 40 Pa pour un bâtiment avec un volume supérieur ou égal à 4000 m³).

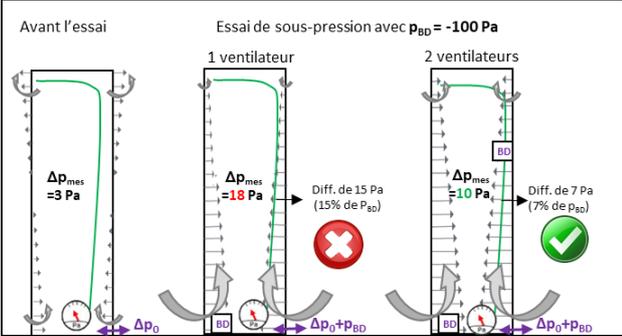
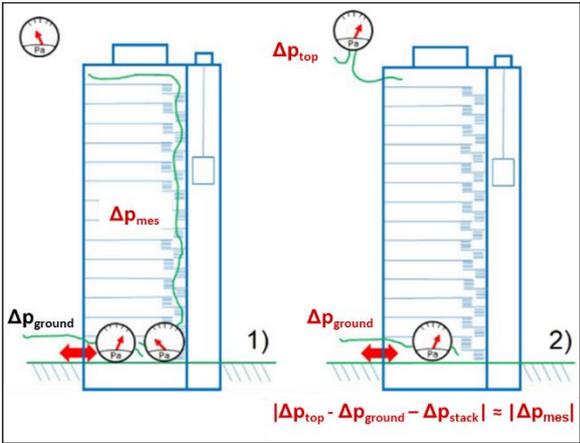
Mais même lorsque ces critères sont respectés, cela ne signifie pas que le résultat d'essai représente correctement le bâtiment testé. Pour cela, il faut pressuriser/dépressuriser l'ensemble du bâtiment. Le tableau ci-dessous donne des recommandations et des conseils pratiques pour effectuer un essai dans les bâtiments de grande hauteur, mais il ne s'agit en aucun cas d'exigences.

² STS-P 71-3 Etanchéité à l'air des bâtiments – Essai de pressurisation - Version 18 december 2014

³ ISO 9972:2015 Performance thermique des bâtiments — Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments — Méthode de pressurisation par ventilateur

Une partie de ces conseils pratiques sont tirés de *Airtightness measurement of high-rise buildings*, Passive House Institute, Sept. 2019 par S. Peper et J. Schieders.

Conseils pratiques	Les raisons
Limiter la différence de température	
Si possible, effectuez le test de nuit (à condition que les besoins de sécurité pour le bâtiment et le testeur puissent être satisfaits), et/ou à la mi-saison.	La diminution de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment réduit l'effet de cheminée.
Ventilation massive du bâtiment avant le test si possible (fenêtres et portes ouvertes pendant plusieurs heures et chauffage/climatisation coupés).	
Fermez les volets ou autres protections solaires	
Vérifier que tout le bâtiment est pressurisé/dépressurisé	
<p>La pression induite p_{BD} mesurée au rez-de-chaussée doit être (en plus des exigences des STS-P 71-3) telle que:</p> $ p_{BD} > \max(\Delta p_{0,ground} ; \Delta p_{0,top}) + 10 \text{ Pa}$ <p>Avec $\Delta p_{0,ground}$ et $\Delta p_{0,top}$ les pressions à débit nul mesurées respectivement au rez-de-chaussée et au dernier étage. $\Delta p_{0,top}$ peut également être estimée à partir de $\Delta p_{0,ground}$ et de la Δp_{stack} calculée (équation (4)).</p> <p>Cela augmente la probabilité que le bâtiment ENTIER soit sous pression négative (essai de dépressurisation) ou sous pression positive (essai de pressurisation), avec une marge de sécurité de 10 Pa. Notez que cette marge de sécurité peut ne pas être suffisante en cas de vents forts.</p> <p>La ou les sondes de pression externe(s) doivent mesurer la pression statique externe et être à l'abri du vent (ce qui peut être difficile au dernier étage).</p> <p>Comme pour tout essai, la sonde de pression externe doit être située au rez-de-chaussée et rester au même endroit pour la mesure de la pression à débit nul et pendant l'essai.</p>	<p>Si une partie de l'enveloppe du bâtiment a une pression de signe opposé, les fuites dans cette zone s'écouleront dans la direction opposée à la condition de test, et diminueront artificiellement la perméabilité à l'air mesurée.</p>  <p>La mesure de la différence de pression à l'étage supérieur sert uniquement à définir la valeur du premier point de mesure. Seule la pression au rez-de-chaussée doit être utilisée pour effectuer la mesure (contrôler le ventilateur). Il est important de rappeler que la pression externe en haut du bâtiment est probablement prise près de la façade et n'est pas une bonne référence (fortement influencée par le vent) pour le test.</p>
Vérifier l'homogénéité de la pression dans le bâtiment	
Emplacement du ventilateur: le plus près possible de la ou des cages d'escalier/de l'ascenseur. En général, il est plus facile de le placer au rez-de-chaussée, mais si	Le ventilateur doit être situé le plus près possible des cages d'escalier/ascenseurs reliant toutes les parties du bâtiment. Cela permet de réduire les obstacles au flux d'air et donc les

<p>possible, l'emplacement idéal pour l'homogénéité de la pression serait à mi-hauteur.</p>	<p>pertes de pression du ventilateur vers la pièce la plus critique⁴.</p>
<p>Pendant l'essai, pour vérifier la perte de pression à travers la cage d'escalier et les circulations vérifier que la différence de pression entre le haut et le bas du bâtiment ne varie pas de plus de 10% de p_{BD} en comparant avant et pendant l'essai (écart de pression).</p> <p>Si cette condition n'est pas respectée, utiliser plusieurs ventilateurs pour répartir la pression sur le volume interne du bâtiment.</p>	<p>Comme il est impossible d'obtenir une pression uniforme à l'intérieur des bâtiments de grande hauteur, il est conseillé d'avoir une différence de pression similaire entre le haut et le bas du bâtiment avant, pendant et après l'essai de pressurisation.</p> 
<p>Deux possibilités pour mesurer l'écart de pression⁵:</p> <p>1) Mesure de la différence de pression dans le bâtiment au moyen d'un tuyau de pression allant du rez-de-chaussée à la salle critique. Le tuyau étant situé à l'intérieur du bâtiment, aucune correction n'est nécessaire ici⁶.</p> <p>2) Mesure de la différence de pression avec l'environnement. L'influence des effets thermiques doit être déduite (voir le calcul de Δp_{stack} au §1.1 avec la densité de l'air prise pour la température à mi-hauteur du bâtiment).</p> <p>Pour éviter l'impact du vent sur la mesure supérieure, l'option 1) est préférable. Lorsque seule l'option 2) est possible, la pression peut être mesurée sur plusieurs façades et moyennée (si possible).</p>	<p>Illustration des deux méthodes de mesure avec l'exemple d'une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de 50 Pa au rez-de-chaussée ($\Delta p_{0,ground} + p_{BD}$)</p> 

⁴ La pièce critique est la plus éloignée en termes de trajet de l'air de la place où la pression est mesurée, elle est probablement située au dernier étage, à l'extrémité d'un couloir. Néanmoins, l'identifier n'est pas toujours facile (c'est une combinaison de débit d'air, de distance et d'obstructions) et peut nécessiter des mesures sur chaque emplacement critique potentiel pour comparaison.

⁵ S. Peper et J. Schieders *Airtightness measurement of high-rise buildings*, Passive House Institute, Sept. 2019

⁶ Dans ce cas, les tubes descendent le long du bâtiment, donc le manomètre ne mesurera que la différence de pression due aux pertes de pression dans le bâtiment et non la différence de pression due à la différence de hauteur.

Si nécessaire, divisez le bâtiment pour le test

La réglementation en Flandre⁷ permet de diviser un bâtiment multifamilial en plusieurs zones au lieu de mesurer l'ensemble du bâtiment en un seul test.

Les fuites internes seront incluses dans la mesure, ce qui peut surestimer la perméabilité globale du bâtiment.

Dans certains cas, la mesure peut être effectuée sur une partie seulement du volume protégé (et sa zone de déperdition thermique correspondante), mais toujours au moins sur l'unité prévue correspondant au calcul de l'EPB.

Comme d'habitude, la pression à débit nul ($\Delta p_{0,ground}$) est soustraite des différences de pression mesurées (Δp_s) pour le calcul de la pression induite (p_{BD}) ($\Delta p_s = p_{BD} + \Delta p_{0,ground}$).

Une illustration de la complexité de la mesure de l'étanchéité à l'air des bâtiments de grande hauteur est donnée dans le document *Airtightness measurement of high-rise buildings*⁸ avec l'exemple d'un gratte-ciel de 120 m de haut avec une différence de température de 15°C entre l'intérieur et l'extérieur, induisant un $\Delta p_{0,ground} = -36$ Pa. Notez que selon les STS-P 71-3, une mesure dont $\Delta p_{0,ground}$ est supérieur à 5 Pa n'est pas permis pour les "petits bâtiments". Pour les "grands bâtiments" avec un $\Delta p_{0,ground} = -36$ Pa, le point de mesure le plus bas (en dépressurisation) $\Delta p_{s,ground}$ devrait être de -40 Pa et au moins -180 Pa devrait être atteint.

Cependant, comme l'illustre la Figure 5, le bâtiment n'est complètement dépressurisé qu'à partir d'environ $\Delta p_{s,ground} = -72$ Pa mesuré au rez-de-chaussée, ce qui correspond à une pression générée de $p_{BD} = |\Delta p_{0,ground}|$ (avec $\Delta p_{s,ground} = \Delta p_{0,ground} + p_{BD}$). Par conséquent, les points de mesure ne doivent être utilisés qu'à partir de -72 Pa. Les ventilateurs ne sont souvent pas calibrés pour des pressions très élevées, ce qui peut limiter la plage des mesures de pression. De plus, ces hautes pressions locales peuvent causer des dommages au bâtiment. Par conséquent, les valeurs mesurées dans la gamme de différence de pression générée de 50 Pa peuvent être suffisantes pour une indication significative (voir Figure 5). Ceci montre d'ailleurs l'importance de limiter autant que possible la pression de base.

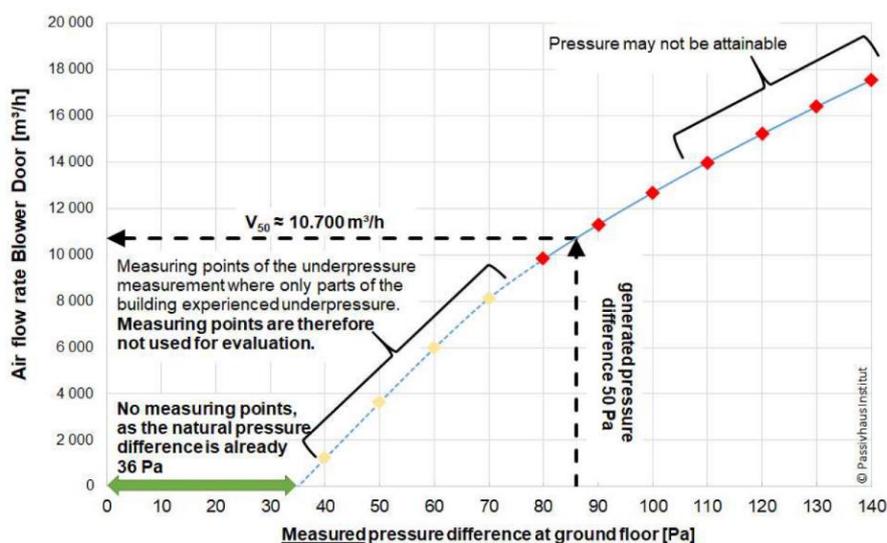


Figure 5 – Essai d'étanchéité à l'air d'un gratte-ciel de 120 m de haut avec $\Delta T=15^\circ C$ ⁸

⁷ BIJLAGE 6 BIJ HET MB VAN 28 DECEMBER 2018 'Bijkomende specificaties voor de meting van de luchtdichtheid van gebouwen in het kader van de EPB-regelgeving' <https://www.energiesparen.be/epb-pedia/bijlagen-coördinatiemb#bijlage6>

⁸ S. Peper et J. Schieders *Airtightness measurement of high-rise buildings*, Passive House Institute, Sept. 2019

4 ANNEXE 1: NOMENCLATURE

Symboles romains

C	Coefficient de fuite d'air	$m^3/(s.Pa^n)$
g	Accélération gravitationnelle	m/s^2
H	Hauteur du bâtiment	m
n	Exposant du débit	-
p	Pression relative à la pression externe	Pa
p+	Essai de pressurisation	-
p-	Essai de dépressurisation	-
q	Débit d'air volumétrique	m^3/s
T	Température	K
Z	Hauteur depuis le sol	m

Symboles grecs

Δp	Différence de pression	Pa
ΔT	Différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment	$^{\circ}C$
ρ	Densité de l'air	kg/m^3

Subscripts

av	Moyenne (entre les résultats en pressurisation - dépressurisation)
BD	Equipement de porte soufflante (Blower door)
down	Fuite basse
est	Valeur estimée
ext	Exterieur
ground	Niveau du rez-de-chaussée
int	Intérieur du bâtiment
j	Indice de fuite
nostack	Pas d'effet de cheminée (même température à l'intérieur et à l'extérieur)
ref	Pression de référence
s	A une station de mesure de pression (lors d'un essai de pressurisation)

stack	Effet de cheminée
t	Total (haut + bas)
top	Niveau du dernier étage
up	Fuite haute
0	Mesure de la pression à débit nul