



Etanchéité à l'air des réseaux de ventilation

Valérie Leprince, PLEIAQ, France
Nolwenn Hurel, PLEIAQ, France
Maria Kapsalaki, INIVE, Greece

1 Introduction

Plusieurs études ont démontré l'impact significatif des fuites d'air dans les réseaux de ventilation sur la consommation énergétique des ventilateurs [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Cependant, un sondage récent effectué dans le cadre du groupe de travail TAAC (Tightvent Airtightness Association Committee) a montré qu'en Europe la problématique d'étanchéité à l'air des réseaux est très peu prise en compte [10]. De plus, des mesures récemment effectuées en France pour le label Effinergie + [11] attestent que près de 50% des réseaux dans les maisons testées avaient une étanchéité à l'air des réseaux de 2.5*classe A ou pire. Cette étude souligne la nécessité de modifier les habitudes de construction, puisque pour la plupart des bâtiments testés, une étanchéité d'au moins classe A était prévue (exigée par le label Effinergie +) mais n'a pas été atteinte.

Ce document a pour objectif de compléter le Ventilation Information Paper (VIP) ou "Airtightness of ventilation ducts" [12]. Il présente une analyse bibliographique des travaux effectués depuis 2003 dans le domaine de l'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation.

Il vise à informer sur:

- l'impact de l'étanchéité à l'air des réseaux ;

- les réglementations et normes ;
- les méthodes de mesure ;
- la mise en œuvre de l'étanchéité des réseaux.

2 Les classes d'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation

Des classes d'étanchéité à l'air allant de A à D déterminent le niveau d'étanchéité dans le réseau de ventilation. Le Tableau 1 donne le débit maximum de fuite d'air pour chacune des classes d'étanchéité à l'air d'après les normes CEN (EN 12237 & EN 1507). Afin de monter d'une classe d'étanchéité, un système de ventilation doit devenir trois fois plus étanche. Les classes C et D correspondent à des réseaux très étanches alors que la classe A ou les classes inférieures (classifiées 3A, 9A, 27A) correspondent à des systèmes très peu étanches à l'air.

Tableau 1: Les classes d'étanchéité à l'air des réseaux d'après les normes CEN

Classe d'étanchéité à l'air	Limite du débit de fuite d'air (L/s.m ²)
A	0.027 $p_{test}^{0.65}$
B	0.009 $p_{test}^{0.65}$
C	0.003 $p_{test}^{0.65}$
D	0.001 $p_{test}^{0.65}$

3 Comment les fuites dans les réseaux impactent-elles la consommation ?

3.1 Impact sur la consommation du ventilateur et/ou la qualité d'air intérieur

Lorsqu'un réseau de ventilation fuit, une partie du débit généré par le ventilateur vient des (pour les réseaux d'extraction) ou s'échappe par (pour les réseaux de soufflage) les fuites plutôt que les bouches d'air. Ainsi, le ventilateur a besoin d'envoyer plus d'air pour compenser le débit et les pertes de pression supplémentaires engendrés par ces fuites. Si le ventilateur ne fait pas cette compensation de débit, les débits requis aux bouches d'air ne sont alors pas atteints, ce qui peut entraîner une mauvaise qualité d'air intérieure (QAI). C'est ce qui a été illustrée dans une étude de terrain [13] sur un bunker (sans ouverture vers l'extérieur) qui dépend que du système CVC pour assurer une bonne qualité d'air : lorsque l'étanchéité à l'air du réseau et du système CVC a été augmentée (de 1.5*classe A à classe C), la concentration moyenne en CO2 a chuté de 1400 ppm à 650 ppm.

Parallèlement, si le ventilateur compense les fuites (avec soit une puissance plus élevée, soit un temps de fonctionnement plus long), sa consommation augmente. Une étude a montré sur un exemple que la consommation du ventilateur doublait lorsqu'il s'ajustait pour délivrer le débit d'air requis [3].

Il est possible que le ventilateur ne compense que partiellement les fuites, et induise donc à la fois une augmentation de la consommation énergétique et une détérioration de la QAI. Ceci est résumé dans la Figure 1 et expliqué plus en détail dans [14].

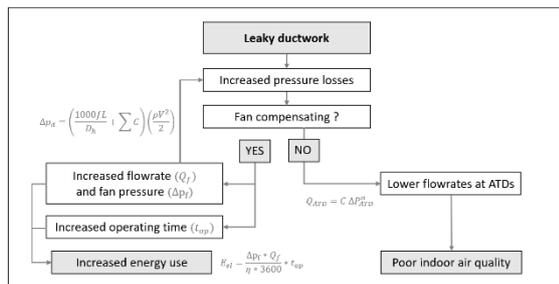


Figure 1: Impact des fuites d'un réseau sur la consommation d'énergie et/ou la QAI

Consommation du ventilateur

La consommation électrique du ventilateur dépend du débit qu'il induit et de la différence de pression à ses bornes.

$$P_{el} = \frac{\Delta p_f * Q_f}{\eta_f * 3600} \quad (1)$$

P_{el}	W	Puissance électrique du ventilateur
Δp_f	Pa	Différence de pression au ventilateur
Q_f	m ³ /h	Débit au ventilateur
η_f		Rendement du ventilateur (peut dépendre de la pression et du débit)

Plus la perte de pression (résistance) dans le réseau est élevée, plus la différence de pression générée par le ventilateur doit augmenter pour compenser cette résistance et délivrer le débit hygiénique requis.

Ainsi, les fuites peuvent être compensées par une puissance du ventilateur plus élevée ou par un temps de fonctionnement plus long pour atteindre les mêmes concentrations moyennes de polluants. Dans les deux cas, la consommation énergétique est augmentée.

Pertes de pression

Les courbes de pression le long d'un simple conduit d'extraction sont présentées à la Figure 2 pour 3 cas:

- 1) sans fuite ;
- 2) avec fuites non compensées par le ventilateur: l'écart de pression est réduit au niveau de la bouche, ce qui induit un débit d'air plus faible (mauvaise QAI) ;
- 3) avec fuites compensées par le ventilateur : même écart de pression à la bouche d'air que pour 1) pour atteindre le débit d'air hygiénique ce qui nécessite une augmentation de la pression au ventilateur (consommation plus élevée).

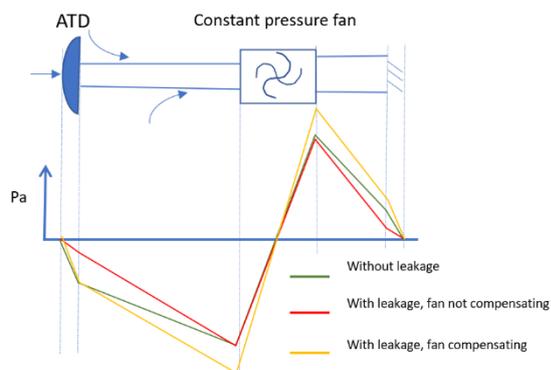


Figure 2: Evolution de la pression dans le système d'extraction avec et sans fuites en fonction de la pression générée par le ventilateur

Modèles de calcul

Théoriquement, les pertes de charge dans le réseau étant proportionnelles au carré du débit, la puissance du ventilateur doit être proportionnelle au cube du débit. Cependant, le rendement du ventilateur dépend également du débit et de la résistance dans le réseau. Cette relation entre le rendement et le débit et la pression dépend du type de ventilateur utilisé (axial ou centrifuge et synchrone ou à courant continu). Modera [15] a ainsi estimé que la puissance du ventilateur varie avec son débit selon une loi de puissance dont l'exposant est compris entre 2 et 3.

Il est possible d'utiliser le modèle basé sur l'EN 16798-5-1 [16] et développé par Leprince & Carrié [9] afin d'estimer la surconsommation induite pour compenser les fuites dans le réseau de ventilation. Cette étude souligne qu'étanchéifier le réseau ne conduit pas toujours à une réduction des consommations (si le ventilateur ne compensait pas les fuites avant) mais permettra toujours de soit réduire la consommation du ventilateur, soit améliorer la QAI ou les deux à la fois.

Pour les systèmes à débit d'air variable (DAV ou VAV pour l'acronyme anglais), Wray & Sherman [17] ont développé un modèle de fuites dans les réseaux sur Energy Plus afin d'évaluer l'impact de ces fuites sur la consommation du ventilateur. Le modèle s'applique aux grands bâtiments avec un système à débit d'air variable puisqu'il considère la répartition des fuites de chaque côté du système DAV (haute et basse pressions).

Les calculs et mesures effectuées dans les différentes études sont résumés dans le Tableau 2. Il est montré que l'amélioration de l'étanchéité des réseaux de ventilation peut réduire la consommation du ventilateur de 30% à 75%.

3.2 Perte d'air préconditionné

Aux Etats-Unis, l'air de la ventilation est souvent conditionné (chauffé ou refroidi). Une étude de 2005 indique que 10 à 30% de l'air conditionné dans un système de climatisation centralisé classique est perdu par les fuites des conduits [18]. Ainsi, la préoccupation majeure aux Etats-Unis concernant les fuites dans les réseaux est celle de la perte d'air préconditionné.

En effet, les fuites augmentent également les besoins de chauffage et de refroidissement puisque:

- lorsque les fuites sont situées en zone climatisée, une sur-ventilation peut être induite ;
- lorsque l'air est préconditionné et les fuites du réseau de soufflage sont situées en zone non climatisée, l'air préconditionné n'est pas pleinement utilisé pour le bâtiment (perte d'air chauffé ou refroidi) ;
- lorsqu'un échangeur est présent, les fuites du réseau d'extraction dans une zone non climatisée réduisent la récupération d'énergie ;
- lorsque l'air est pré-refroidi, un impact secondaire de l'augmentation de la puissance de ventilateur est l'augmentation des besoins de froid associée à la chaleur générée par cette puissance plus élevée du ventilateur [15].

Une problématique de confort peut également être induite puisque les fuites dans les réseaux d'air préconditionné peuvent empêcher l'air d'arriver jusqu'aux pièces visées, entraînant une disparité avec des pièces trop chaudes ou trop froides.

Modèles de calcul

Il est possible de calculer l'impact des fuites des réseaux sur la consommation du ventilateur en se basant uniquement sur les caractéristiques du ventilateur et du réseau. Cependant, concernant les besoins en chauffage et refroidissement les

calculs sont plus complexes puisqu'ils dépendent également des caractéristiques du bâtiment et du climat. Ainsi l'estimation de l'impact des fuites sur les besoins en chauffage et refroidissement peut nécessiter une simulation énergétique dynamique complète pour l'ensemble du bâtiment ou d'effectuer des mesures sur site.

La nouvelle norme CPEB, EN 16798-5-1 [16], inclut maintenant des équations pour prendre en compte les fuites des réseaux sur les besoins de chauffage et refroidissement dans les calculs énergétiques réglementaires. C'est également le cas dans la réglementation thermique française (RT 2012).

Afin d'estimer l'impact des fuites dans les réseaux et la perte de chaleur par conduction en conditions stationnaires, Carrié & Leprince [19] ont développé un modèle simple basé sur l'EN 15241 (maintenant EN 16798-5-1) qui est implémentée dans la RT française. En exemple d'application, pour un système de ventilation double flux avec échangeur de chaleur et un réseau de 3^e classe A avec 20 m² hors zone climatisée, le rendement de l'échangeur est presque réduit de moitié par ces fuites.

Mesurer l'impact des fuites dans les réseaux sur les besoins de chauffage et refroidissement est également complexifié par le fait que les fuites interfèrent avec les pertes par conduction.

Etant donné qu'à la fois les calculs et les mesures sont compliqués, peu d'études estiment l'impact des fuites dans les réseaux sur les besoins en chauffage et climatisation (présentées dans le Tableau 2). L'impact des fuites sur les besoins de chauffage est estimé entre 5 et 18% et entre 10 et 29% pour les besoins de refroidissement. L'impact le plus important semble être pour le dimensionnement de la puissance de refroidissement qui peut être augmentée de 48% si les fuites sont prises en compte.

3.3 Etudes de cas

Les études de cas illustrant l'impact des fuites dans les réseaux de ventilation sont listées dans le Tableau 2. La plupart se concentrent sur l'impact de celles-ci sur la consommation du ventilateur ou sur les besoins en chauffage/refroidissement détaillés dans les sections précédentes.

Certaines études estiment la perte cumulée d'énergie et/ou le coût financier associé et permettent de comparer ce coût avec le surcoût induit par la mise en place d'un réseau étanche. Selon Soenens & Pattijn [1], l'investissement supplémentaire pour atteindre une bonne étanchéité à l'air du système de ventilation dans les nouveaux bâtiments est faible comparé aux pertes d'énergie évitées.

D'autres effets des fuites dans les réseaux sont aussi reportés, tels que l'impact sur le bruit qui a tendance à augmenter avec le débit dans le conduit. Dans [13], lorsque l'étanchéité à l'air du réseau et de la Centrale de Traitement d'Air (CTA) a été améliorée, les occupants du bunker ont noté une réduction du bruit.

Les fuites peuvent avoir 3 effets liés au bruit qui nécessitent des recherches plus approfondies:

1. L'augmentation du débit du ventilateur et de la pression nécessaire accroît le bruit produit par le ventilateur
2. Les fuites peuvent aussi augmenter la transmission de la pression acoustique du ventilateur
3. Les fuites peuvent créer leur propre bruit de « sifflement »

Les fuites situées en aval des filtres mais avant le ventilateur peuvent court-circuiter le filtre, induisant des problématiques de mauvaise QAI. Il semblerait également que les fuites peuvent favoriser l'encrassement des filtres [4], des échangeurs de chaleur et des conduits puisque les débits les traversant sont plus importants.

De plus, les fuites dans les réseaux induisent des mouvements d'air non contrôlés qui peuvent entraîner une dépressurisation, induisant elle-même un contre-tirage des équipements de combustion, ou une pressurisation induisant des problèmes de moisissure dans les murs [15]. Ce déséquilibre peut également perturber la protection contre les contaminations dans les zones sensibles (blocs opératoires, salles blanches, etc.).

Tableau 2: Etudes de cas sur l'impact des fuites du réseau présentées dans la littérature

Auteurs	Année	M/C*	Description	Fuites	Impact
Carrié et al. (Save-duct)	(2000)	M C	Mesure sur site en France et Belgique et calculs (42 systèmes de conduits)	Gains énergétiques cumulés en Europe par l'installation de réseaux étanches dans les nouveaux bâtiments et rénovations : environ 10 TWh en 10 ans	
			Bâtiments résidentiels et tertiaires	Diminution de la capacité de refroidissement de l'air délivré par les grilles à registre de 10-40% à cause des fuites, pertes par conduction et convection	
Modera	(2005)	C	Calculs selon la norme 152-2004 avec le réseau situé dans les faux-plafonds (bâtiment tertiaire léger). Pour 3 climats aux Etats-Unis et 3 types d'isolation	Entre 35% et 6% du débit double flux	+5 à +18% sur les besoins de chauffage +10 à +29% sur les besoins de refroidissement Jusqu'à +48% pour le dimensionnement de la puissance de refroidissement
Wray et al.	(2010)	C	Simulations	Entre 2.5% et 10%	+30% sur la puissance du ventilateur de soufflage (les fuites en amont du système DAV ont un plus grand impact)
Guyot et al. (ASIEPI)	(2010)	C	Calculs avec outil de la RT française	Efficacité globale d'un système de récupération de chaleur réduite de 85% (valeur nominale) à moins de 60% à cause des fuites dans les conduits (équivalentes à environ 5 kWh/m ² /an de chauffage)	
Dyer	(2011)	C	Simulation sur une grande usine pharmaceutique	5 fois les normes SMACCNA	+ \$1,000,000 sur la durée de vie du système (chauffage et refroidissement)
Soenens & Pattijn	(2011)	C	3 cas simulés : une aile d'hôpital, une maison de repos et un bâtiment de bureau	Les consommations énergétiques totales liées à la ventilation peuvent être réduites de plus de 30% avec un système de ventilation étanche	
Bailly et al.	(2014)	C	Calculs sur 3 maisons tests.	2.5* classe A ; fuites en zone climatisée induisant une sur-ventilation	+13% des consommations de chauffage
Berthault et al.	(2014)	M	Reproduction en laboratoire d'un réseau de ventilation résidentiel	De 1.5* classe A à classe C	Presque -50% sur la consommation du ventilateur
Leprince & Carrié	(2018)	C			
Krishna moorthy & Modera	(2016)	C	Centrale de chauffage et refroidissement de l'air extérieur dans un bâtiment tertiaire avec un système DAV	De 19% à 2%	\$1.72 à \$2.8 par m ² /an (inclut la puissance du ventilateur, perte de chaleur du ventilateur, et l'excès d'air extérieur conditionné)
Zhivov & Lohse	(2017)	C	Aux Etats-Unis, les fuites dans les systèmes CVC, qui sont considérées comme la première source de gaspillage d'énergie dans les bâtiments tertiaires, ont induit une perte estimée à \$2.9 milliards en 2005		
Richieri et al.	(2018)	M	Rénovation du système de ventilation d'un bunker	De 30% à 5%	Environ -75% sur la puissance du ventilateur

* M: mesures
C: calculs



Consommation ventilateur



Besoins chauffage et/ou refroidissement



Pertes cumulées

4 Où en sommes-nous?

D'après un sondage réalisé dans le cadre du groupe de travail TAAC [22], la prise en compte de l'étanchéité à l'air des réseaux a modérément augmenté en Europe. Cependant, la problématique de l'efficacité des systèmes de ventilation est davantage prise en compte, ce qui pourrait donner lieu à des avancées sur l'étanchéité des réseaux. Cette section résume les informations publiées dans la littérature sur les réglementations nationales et sur les niveaux d'étanchéité des réseaux par pays.

4.1 Réglementations

Le Tableau 3 présente les réglementations nationales et les niveaux d'étanchéité à l'air des réseaux au Portugal, Royaume-Uni, en France, Suède, Norvège et Finlande.

4.2 Impact sur les calculs réglementaires sur la performance énergétique des bâtiments

Un questionnaire sur la prise en compte de l'étanchéité des réseaux dans les réglementations a été envoyé aux membres du groupe TAAC [10]. Les membres de seulement 4 pays ont répondu (Belgique, France, Lettonie et Allemagne), et les membres de la République Tchèque et de la Pologne ont indiqué que la problématique de l'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation n'était pas vraiment considérée dans leur pays.

Parmi les pays répondants, seule la France (RT 2012) et la Belgique considèrent l'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation comme une entrée dans les calculs réglementaires sur la performance énergétique des bâtiments, mais sans exigence minimale.

En France, la classe d'étanchéité à l'air des réseaux est une entrée pour les calculs de la RT, ainsi que la proportion des fuites situées en zone climatisée. Ces données sont utilisées afin de:

- Calculer les pertes thermiques de l'air à la fois dans les réseaux d'extraction et de soufflage
- Calculer la sur-ventilation due aux fuites dans les zones climatisées

Cependant, la puissance du ventilateur est également une entrée de ces calculs

réglementaires mais n'est pas corrigée en fonction des fuites du réseau. La valeur par défaut utilisée en France est 2.5*classe A.

En Belgique, le débit de fuite dans les réseaux (selon l'EN 14134) est une entrée pour les calculs de performance énergétique seulement pour les bâtiments résidentiels. Par défaut (sans mesure), il est supposé que les fuites représentent 18% du débit requis. Les fuites induisent une sur-ventilation dans les zones climatisées et donc des pertes thermiques en hiver. Comme en France, l'impact sur la consommation du ventilateur n'est pas directement calculé dans les calculs réglementaires de la performance énergétique mais doit être mesuré à la mise en service et donc être pris en compte.

Les "Approved Documents" de la réglementation des bâtiments britannique et les guides de conformité associés font peu référence à l'étanchéité à l'air dans les réseaux pour les systèmes de ventilation mécaniques résidentiel. Cependant, SAP 2012 (le logiciel utilisé pour calculer la performance énergétique de nouveaux bâtiments résidentiels) contient une gamme de «coefficients d'usage» pour estimer la performance des systèmes de ventilation mécanique installés de manière plus précise (voir Tableau 4). Leur rôle est de traduire l'impact des types d'installation et des types de conduits : flexibles, semi-rigides ou rigides. Si l'installation est faite selon un «schéma d'installation agréé», le coefficient d'usage est plus petit. La puissance du ventilateur est proportionnelle au coefficient d'usage.

Tableau 3: Réglementations sur l'étanchéité à l'air des réseaux de 6 pays

Pays	Réglementation	Application
Portugal	Depuis 2006 : tests obligatoires pour les nouveaux systèmes CVC dans les bâtiments plus grands que 1000 m ² inclus dans la réglementation. Les fuites dans les réseaux ne doivent pas dépasser 1.5 L/s.m ² sous 400 Pa ¹	Rarement appliqué. Un sondage sur les 15 principaux acteurs (11 réponses) du marché a montré que 64% d'entre eux ont réalisé seulement 1 à 10 tests/an (seulement 4 ont leurs propres équipements) ²
Royaume-Uni	Tests obligatoires pour les systèmes de réseaux à haute pression (ventilation tertiaire) selon BESA DW/143 ³ , la classe C doit être atteinte	Les fabricants de conduits choisissent la section qui sera testée et peuvent demander des tests supplémentaires. Le test est généralement effectué par l'entreprise de construction
France	Une justification est nécessaire pour prendre une meilleure valeur que celle par défaut pour les calculs de la RT (test effectué par un testeur certifié ou démarche qualité certifiée). Les programmes français Effinergie + et Effinergie BEPOS exigent une classe A justifiée pour l'étanchéité des réseaux ¹	Plus de 100 testeurs certifiés en 2020 (Qualibat 8721) Directives spécifiques pour les tests : FDE 51-767, 2014 Prise en compte de l'étanchéité à l'air des réseaux qui a augmenté entre 2002 et 2005 ¹
Suède	Exigences sur les réseaux présentes depuis l'AMA de 1966 et se sont durcies depuis ⁴ . Dans la version de 2007 : tous les réseaux doivent atteindre la classe C. 10% des conduits ronds et 20% des conduits rectangulaires doivent être vérifiés.	Il est coûteux pour les sociétés de construction d'installer des systèmes de réseau moins étanches : ils doivent payer à la fois pour le travail correctif et pour les tests supplémentaires. Cela les motive à s'assurer que le travail est effectué correctement dès le départ ⁵
Norvège	La réglementation des bâtiments précise seulement que « les conduits et CTA doivent avoir une étanchéité satisfaisante » (pas d'exigence quantifiée) ³	Les propriétaires de bâtiments indiquent généralement une classe B, et plus de 90% des réseaux installés sont des conduits circulaires équipés de joints ³
Finlande	Les réglementations des bâtiments exigent au minimum une classe B pour l'ensemble du système et recommande l'utilisation de conduits et composants de classe C ou mieux. ⁵	Si le système dessert plus d'une pièce, des mesures sont effectuées pour vérifier la conformité avec la réglementation. Un échantillonnage est possible si les composants installés sont de classe C ou D

¹ Leprince et al [10]

² Lisboa [23]

³ BESA [24]

⁴ Andersson [25]

⁵ Schild & Railio [26]

Tableau 4: Coefficients d'usage pour les systèmes de ventilation mécanique (tableau 4h de SAP 2012) – traduit en français

Des coefficients d'usage s'appliquent aux données pour la ventilation mécanique dans toutes les configurations

Types de ventilation mécanique	Schéma d'installation agréé	Coefficient pour la puissance spécifique du ventilateur			Coefficient pour le rendement	
		Conduit flexible	Conduit rigide	Sans conduit	Conduits non isolés	Conduits isolés ^{d)}
Ventilation mécanique par extraction, centralisée ^{a)}	Non	1.70	1.40	-	-	-
	Oui	1.60	1.30	-	-	-
Ventilation mécanique par extraction ou ventilation par entrée d'air extérieur, décentralisée ^{a)}	Non	1.45	1.30	1.15	-	-
	Oui	1.45	1.30	1.15	-	-
Ventilation mécanique double flux, sans récupérateur de chaleur ^{a)}	Non	1.70	1.40 ^{c)}	-	-	-
	Oui	1.60	1.25 ^{c)}	-	-	-
Ventilation mécanique double flux, avec récupérateur de chaleur ^{a)}	Non	1.70	1.40 ^{c)}	-	0.70	0.85
	Oui	1.60	1.25 ^{c)}	-	0.70	0.85
Valeur par défaut (tous types) ^{b)}		2.5			0.70	

^{a)} Utiliser ces valeurs pour des données de base de données ou feuilles de données obtenues depuis www.ncm-pcdb.org/sap

^{b)} Utiliser ces valeurs pour des données de la Table 4g

^{c)} Les valeurs pour les conduits rigides s'appliquent aussi pour les conduits semi-rigides s'ils sont listés dans la base de donnée

^{d)} Cette colonne s'applique lorsque tout le réseau est situé dans l'enveloppe isolé du bâtiment, même si le réseau n'est pas isolé lui-même

4.3 Niveau d'étanchéité des réseaux de ventilation

Deux bases de données sur l'étanchéité à l'air des réseaux de ventilation sont souvent citées dans la littérature : la base de données française du CEREMA et la base de données américaine du Lawrence Berkeley National Laboratory (ResDB).

En plus de comparer les performances entre les pays comme cela a été fait entre la France, la Belgique et la Suède pour le projet SAVE-DUCT et présenté dans le VIP o1 [12], ces bases de données permettent:

- d'observer l'évolution de l'étanchéité à l'air des réseaux ;
- de relever les liens entre les niveaux d'étanchéité des réseaux et les caractéristiques des bâtiments;
- d'estimer le pourcentage du débit dû aux fuites.

4.3.1 Evolution de l'étanchéité à l'air des réseaux

Les résultats du projet SAVE-DUCT ont montré qu'en 1998, 83% des réseaux testés étaient de 3*classe A ou pire. Ils peuvent être comparés à

la nouvelle base de données française, créée en 2016 et rassemblant environ 1300 mesures effectuées par des testeurs certifiés [11]. Puisque la moitié des mesures ont été faites dans des bâtiments demandant le label Effinergie + (qui nécessite une étanchéité de classe A), il n'est pas possible de les généraliser à l'ensemble des nouveaux bâtiments en France. Cependant, les résultats montrent que les bâtiments résidentiels français testés sont principalement de classe A ou mieux, tandis que les bâtiments tertiaires sont de classe B ou mieux (voir Figure 3 & Figure 4). Ainsi, en 20 ans, les fuites dans les réseaux semblent avoir été divisées par un facteur compris entre 3 et 9.

Aux Etats-Unis, les mesures sont rassemblées dans la base de données du LBNL (ResDB). Les contributions sont faites de façon volontaire par les auditeurs en énergie, sociétés de construction, managers de programmes d'efficacité énergétique et chercheurs. L'analyse des données a permis d'estimer qu'entre 2000 et 2010, l'étanchéité à l'air des réseaux dans les maisons résidentielles a été améliorée de 50% pour atteindre 3.7 cfm25 par 100 ft² de plancher climatisé (0.19 L/s/m² à 25 Pa) [27].



Figure 3: Distribution des classes d'étanchéité à l'air mesurées dans les bâtiments résidentiels [11] – traduit en français



Figure 4: Distribution des classes d'étanchéité à l'air mesurées dans les bâtiments tertiaires [11] – traduit en français

4.3.2 Relation entre le niveau d'étanchéité à l'air des réseaux et les caractéristiques du bâtiment

L'analyse de la base de données française par Moujalled, Leprince & Mélois [11] a montré que les niveaux d'étanchéité des réseaux semblent dépendre:

- de l'utilisation du bâtiment (voir Figure 3 & Figure 4);
- du système de ventilation;
- et du type de conduits (flexibles/rigides).

La classe A est la plus souvent obtenue pour les bâtiments résidentiels principalement équipés d'un système de ventilation par extraction simple flux. Dans les logements individuels où les conduits flexibles sont principalement utilisés, 55% des mesures atteignent la classe A ou mieux, contre 77% dans les logements collectifs avec une grande part de conduits métalliques rigides. Dans les bâtiments tertiaires principalement équipés de systèmes de ventilation double flux avec des conduits métalliques rigides, la classe B est la plus

souvent obtenue et 90% des mesures atteignent la classe A ou mieux.

4.3.3 Pourcentage du débit dû aux fuites

Carrié, Andersson & Wouters [28] ont trouvé qu'en France et en Belgique, le ratio entre les débits de fuites d'air dans les réseaux et le débit minimum, mesuré dans 9 logements collectifs, était en moyenne de 13% à 50 Pa. Pour les bâtiments commerciaux et institutionnels, le ratio entre les débits de fuites d'air dans les réseaux et le débit minimum était de 21% à 100 Pa.

Ces résultats sont cohérents avec les mesures effectuées aux Etats-Unis: dans 10 grands bâtiments les fuites des réseaux étaient significatives, atteignant en moyenne 28% du débit du ventilateur [29].

5 Comment mesurer?

5.1 Méthodes de test

5.1.1 Méthode classique

La méthode classique pour mesurer l'étanchéité à l'air d'un réseau de ventilation est décrite dans différentes publications, comme par exemple dans le paragraphe 6.2 du projet SAVE-DUCT (chapitre 6).

Comme illustré à la Figure 5, le conduit testé est « isolé » du reste du réseau, les extrémités du conduit testé sont fermées, tout comme les bouches d'air.

L'équipement de mesure comprend:

- un ventilateur maintenant une pression constante dans le conduit testé ;
- un débitmètre mesurant le débit nécessaire pour maintenir une pression donnée constante ;
- un manomètre, vérifiant la stabilité de la pression.

En général en Europe, le test consiste en une mesure en un seul point du débit de fuite. La pression du test peut soit être la pression de fonctionnement du réseau ou une pression définie par une réglementation ou norme. Par exemple:

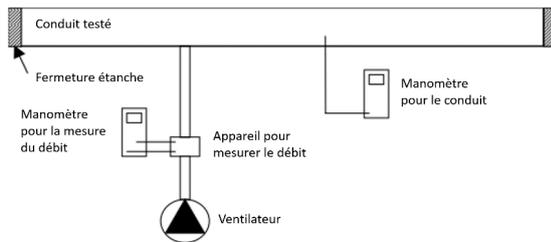


Figure 5: Principe de la mesure par pressurisation et étiquetage [28] – traduit en français

- Aux Etats-Unis, l'étanchéité à l'air des réseaux dans les bâtiments résidentiels est généralement testée à 25 Pa [30]. Les normes décrivant les méthodes de test ASTM E 1554 (2018), RESNET 380 [32] ainsi que la norme ASHRAE 152 [33] utilisent également cette pression de référence. Les bâtiments commerciaux sont testés à des pressions beaucoup plus élevées définies dans les procédures de test SMACNA [34] (de 125 à 2500 Pa).
- En France, les valeurs de test sont définies dans le document FD 51-767:
 - 80 Pa pour les maisons individuelles
 - 160 Pa pour les logements collectifs
 - 250 Pa pour les bâtiments tertiaires

Cependant si la pression par défaut est très différente de celle en fonctionnement, le test peut être fait à cette pression de fonctionnement.

Le débit, la pression et la surface de conduit mesurés donnent un coefficient de fuite par mètre carré de réseau. Ce coefficient de fuite est comparé à la classe d'étanchéité, comme défini la section 2.

$$\frac{Q}{A} = f_{ref} = K \Delta p_{ref}^{0.65}$$

Q	m ³ /s	Débit mesuré
A	m ²	Surface de réseau testée
f _{ref}	m ³ /s.m ²	Facteur de fuite
Δp _{ref}	Pa	Pression du test
K	m ³ /s.m ² .Pa ^{0.65}	Coefficient de fuite

Le résultat peut être exprimé sous la forme d'une surface équivalente de fuite [35] calculée pour un « n » donné (généralement 0.65).

$$A_L = Q \sqrt{\frac{\rho}{2}} \left(\frac{\Delta P_{ref}^{(n-0.5)}}{\Delta P^n} \right)$$

5.1.2 Pressurisation pour les fuites vers l'extérieur

Une autre méthode consiste à estimer les fuites seulement sur les portions du réseau situées à l'extérieur. Dans ce cas, le réseau de ventilation et le bâtiment sont mis sous la même pression au même moment en utilisant une Porte Soufflante pour le bâtiment [36], [31] [32].

5.1.3 La méthode DeltaQ

La méthode classique pressurise le réseau entier à la même pression (la pression du test). Cependant, en fonctionnement réel chaque fuite n'a pas le même impact sur la consommation du ventilateur et sur les pertes de chauffage et refroidissement puisqu'elles ne sont pas soumises à une pression homogène. Ainsi, les fuites situées près du ventilateur ont plus d'impact que celles proches des bouches d'air.

Une autre méthode de test, appelée méthode DeltaQ a été développée aux Etats-Unis pour estimer le débit de fuite réel en conditions de fonctionnement. Les tests DeltaQ utilisent une porte soufflante fixée sur une porte entre l'intérieur et l'extérieur. Quatre tests sont effectués en combinant dépressurisation, pressurisation et avec le ventilateur du système CVC allumé et éteint. Un ordinateur permet d'analyser les données et de calculer les fuites du réseau vers l'extérieur en conditions de fonctionnement. L'ASTM E1554 décrit comment effectuer ce test [30]. En théorie, cette méthode est plus sensible aux conditions de vent puisqu'elle inclut un test d'étanchéité du bâtiment. Cependant, les tests de répétabilité effectués par Walker et al. [36] n'ont pas montré de différence significative avec les autres méthodes.

5.2 L'incertitude des tests d'étanchéité sur les réseaux

D'après Walker et al. [37] le travail de terrain montre que le test de pressurisation pour les fuites vers l'extérieur est la méthode présentant la meilleure répétabilité avec un écart type de seulement 1% du débit le plus faible. Les deux autres méthodes présentent un écart type d'environ 6%. Plus le réseau est étanche, plus la

répétabilité est bonne (écart type entre 0.3 et 3%).

Berthault, Boithias & Leprince [3] ont testé l'impact des pertes de charge, de la répartition des fuites et de la position de l'appareil de mesure sur le résultat d'un test par la méthode classique. Leur étude a montré que:

- la position de l'appareil de mesure ne semble pas avoir d'impact sur les résultats des tests d'étanchéité pour les différentes répartitions de fuites ;
- de très fortes pertes de charge singulières (registre presque fermé) ont un impact sur le résultat lorsque le réseau est très peu étanche.

5.3 Normes et recommandations existantes

5.3.1 Normes européennes et américaines

Concernant les tests d'étanchéité à l'air dans les réseaux, aux Etats-Unis les normes ASTM E1554 [31], RESNET 380 [32] et ASHRAE Standard 152 [33] décrivent la méthodologie pour effectuer les tests.

En Europe, il n'y a pas une norme unique pour décrire les tests d'étanchéité à l'air dans les réseaux, mais une norme par type de conduit.

Les normes existantes pour les tests d'étanchéité dans les réseaux sont listées dans le Tableau 5.

La diversité des normes peut créer une confusion entre les tests d'étanchéité à l'air sur les produits isolés (en laboratoire, non installés) et les tests sur un réseau installé sur site. Même si des composants étanches sont nécessaires pour obtenir un réseau installé lui-même étanche, ils ne suffisent pas à le garantir. Une mauvaise installation peut engendrer des fuites sur le réseau.

5.3.2 Initiatives nationales

Etant donné qu'en Europe il n'y a pas de norme couvrant les multiples types de conduits, des protocoles nationaux ont été élaborés dans des pays où des tests d'étanchéité à l'air sur les réseaux sont effectués. Certains d'entre eux sont présentés dans le Tableau 6.

5.4 Certification des testeurs

Un cadre de certification pour les tests d'étanchéité à l'air sur les réseaux existe en France comme expliqué dans [38]. Depuis 2012, Effinergie a introduit un programme de formation pour les testeurs avec la création du label Effinergie+. Par la suite, le gouvernement a créé une certification pour les testeurs de l'étanchéité à l'air des réseaux qui inclut une formation, un examen sur site et une vérification d'expertise.

Une certification d'installateurs de ventilation incluant les tests existe aussi en Suède.

6 Comment mettre en œuvre un réseau étanche ?

6.1 Installation d'un réseau étanche

Le premier VIP sur l'étanchéité à l'air des réseaux [12] donnait déjà des informations sur la façon de mettre en œuvre des réseaux étanches à l'air. Il est également possible de se référer au livre "Source book for efficient air duct systems in Europe" [39] et au chapitre 4 du projet SAVE-DUCT [28].

Un élément essentiel pour améliorer l'étanchéité à l'air des réseaux est d'installer des conduits avec des joints d'étanchéité intégrés. La part de marché de ces produits augmente dans les pays où l'étanchéité à l'air des réseaux est encouragée. Selon Schild & Railio [40], environ 90-95% des réseaux en Scandinavie sont faits de conduits circulaires en acier avec des joints d'étanchéité intégrés (certifiés avec une étanchéité à l'air de classe C ou mieux).

Des exemples de joints d'étanchéité double lèvres pour des conduits spiralés sont donnés dans [21] et illustrés Figure 6.

Afin d'améliorer l'étanchéité de réseaux existants, une technique pour colmater les fuites des conduits par l'injection d'un aérosol a été mise au point au début des années 2000 aux Etats-Unis et est maintenant utilisée en Europe (depuis 2015). Cette technique illustrée à la Figure 7 permet de colmater 66-86% des fuites dans le système de conduits une fois que le réseau est installé [43].

Tableau 5: Normes européennes de mesure et d'inspection pour les tests d'étanchéité sur les réseaux

Norme	Type de conduit	Objectif	Contenu
EN 12237 [41]	Circulaire; Métallique	Protocole de test	Inclut des définitions, règles d'échantillonnage, procédures de test, équations pour corriger les débits, et contenu de base d'un rapport de test
EN 1507 [42]	Rectangulaire; Métallique		Similaire à l'EN 12237. Inclut la mesure de la déflexion
EN 13403 (2003)	Non-métallique		Inclut une procédure de test qui peut être utilisée soit sur site ou soit en laboratoire
EN 15727 (2010)	Composants		Classifie les composants et donne une méthode de test qui peut être utilisée soit sur site ou soit en laboratoire
EN 14239 (2004)	Tous	Mesure de surfaces	Les protocoles de test d'étanchéité à l'air dans les réseaux font tous référence à cette norme pour la mesure de la surface du réseau
EN 12599 (2012)	Bâtiments tertiaires	Méthode d'inspection	Inclut des références aux normes de mesure ci-dessus (EN 1507 et EN 12237). En révision (2019). Ses prochaines versions devraient inclure davantage d'informations sur les tests d'étanchéité à l'air dans les réseaux. Donne des pressions de test par défaut de 200-400-1000 Pa pour le réseau de soufflage et 200-400-750 pour le réseau d'extraction. La pression la plus proche de celle en fonctionnement doit être choisie

Tableau 6: Initiatives nationales pour les tests d'étanchéité à l'air des réseaux

Pays	Recommandations nationales	Contenu
France	FD E51-767	<p>Complète les normes existantes avec des informations pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gérer les différents types de conduits dans un système - Faire un échantillonnage en fonction du type de bâtiment : la section testée doit être représentative de toutes les formes, tailles, matériaux utilisés dans le réseau (exigences en fonction de la longueur de la jonction et de la surface du réseau) - Prendre en compte des éléments spécifiques : plénum, unités de traitement d'air, manchette souple doivent être inclus dans la section mesurée, si ce n'est pas le cas la pénalité appliquée sur le débit peut atteindre 50% - Choisir la pression de test - Appliquer des corrections en fonction de la pression et de la température - Définir le nombre minimum de CTA testées <p>Impose une calibration de l'appareil de mesure tous les 2 ans avec des exigences sur la précision.</p>
	label Effinergie +	Donne des règles techniques qui permettent d'estimer la surface du réseau forfaitaire en fonction du débit maximum (seulement si le réseau est testé en entier, sans échantillonnage)
Suède	AMA VVS&KYL 19 (CVC et plomberie)	<p>Donne les exigences pour effectuer un test d'étanchéité à l'air sur un réseau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - La pression de test : la pression de fonctionnement (> 200 Pa), sinon la valeur par défaut est de 400 Pa - L'échantillonnage (seulement si le test est fait par un testeur certifié d'une tierce partie) : au moins 10% des conduits circulaires ; 20% des conduits rectangulaires ; surface par défaut : 25 m² (au moins 10 m² requis)
Belgique	Cahier des charges type 105 par la Régie des Bâtiments, 2017 (Article E5 partie 5)	<p>Donne les exigences pour effectuer un test d'étanchéité à l'air sur un réseau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - La surface qui doit être testée : au moins 10 m² et 30% de la surface du réseau - La pression de test pour le soufflage : 400 Pa, 1000 Pa et 2000 Pa respectivement pour une pression de réseau basse, moyenne et haute. - La pression de test pour l'extraction : 500 Pa pour la classe B, 750 Pa pour les classes C et D - L'incertitude maximale de la mesure

		<ul style="list-style-type: none"> - Le protocole de test, la durée et fréquence des mesures - Les corrections sur les mesures en fonction de la pression et de la température réelles.
Royaume-Uni	DW143	<p>Donne des recommandations pratiques pour effectuer un test d'étanchéité à l'air sur un réseau ainsi que pour mettre en place un réseau étanche (au Royaume-Uni, les tests sont principalement effectués par les installateurs)</p> <ul style="list-style-type: none"> - La section du réseau testé et la pression de test doivent être définies en accord avec le client ou le concepteur du système - Le test doit être effectué avant l'isolation et l'installation des bouches d'air - Le test est toujours effectué sous pression positive, même pour les réseaux d'extraction, afin de pouvoir tracer le chemin de l'air (spécifique au Royaume-Uni) - Seuls les tests sur les réseaux à haute pression (supérieure à 1000 Pa) sont obligatoires, sans échantillonnage (100% du réseau testé) - Il est recommandé de tester au moins 10% des réseaux à pression moyenne.

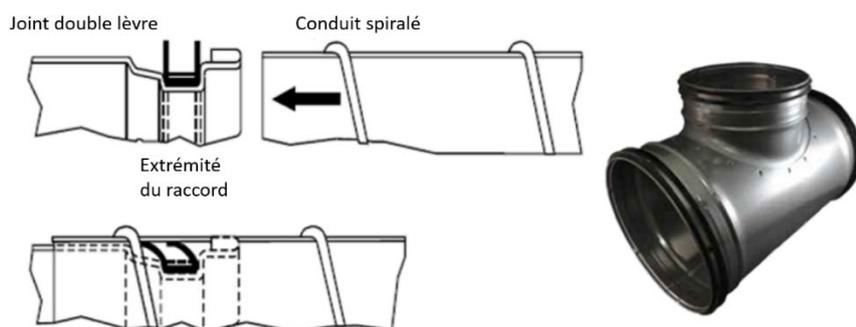


Figure 6: Exemple de joints double lèvre (Linx Industries)

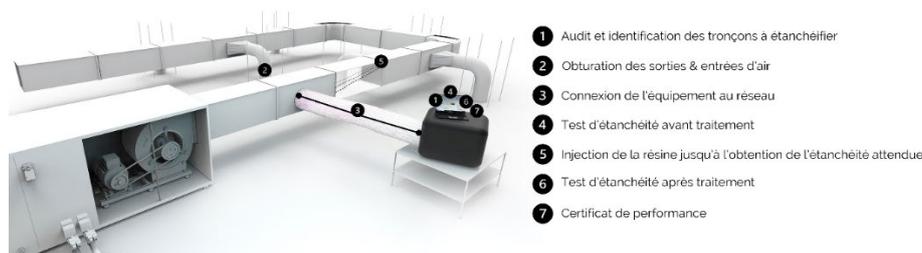


Figure 7: Procédé d'étanchéification par aérosol des réseaux installés (source Aero Seal - Mapclim)

6.2 Certifications existantes

Eurovent Certita Certification a mis en place un nouveau programme de certification pour les systèmes des réseaux de ventilation. Il est présenté dans [44]. L'objectif était de garantir que la classe d'étanchéité à l'air avancée par les constructeurs peut effectivement être atteinte en pratique si le système est correctement installé. Contrairement aux initiatives présentées dans le Tableau 6, c'est une certification qui porte sur les produits et non une certification de bâtiment.

Les exigences pour le programme DUCT reposent sur:

- des tests sur des installations types de réseaux de ventilation ; et
- le contrôle des sites de production

Le champ d'application de ce programme inclut à la fois les réseaux de ventilation en conduits rigides et semi-rigides.

6.3 La durabilité de l'étanchéité à l'air des réseaux

Un protocole pour estimer la durabilité des éléments d'étanchéité des réseaux a été mis en place par Sherman & Walker [45]. Les tests comprennent le vieillissement de simples joints « core-to-collar » entre conduits flexibles et colliers en tôle, et joints « collar-to-plenum » en tôle. Des tests périodiques de fuites d'air et des inspections visuelles ont été effectués pour documenter des évolutions dans les performances d'étanchéité. Suite à cette étude une norme ESTM (E2342-03) a été rédigée pour normaliser les procédures de test et augmenter la fiabilité des tests qui sont effectués pour évaluer les éléments d'étanchéité.

7 Conclusion : de quoi avons-nous besoin ?

Aux Etats-Unis, de par les habitudes de construction, le sujet est traité depuis maintenant plus de 20 ans puisque l'étanchéité à l'air des réseaux a un impact fort sur les besoins de chauffage et de refroidissement. Dans les pays européens, sur les 10 dernières années un gros travail a été fait pour encourager l'étanchéité à l'air des réseaux et cette problématique est petit à petit davantage prise en compte.

Cependant, il reste à approfondir l'impact de l'étanchéité à l'air des réseaux sur les consommations d'énergie dans les bâtiments. Pour ce qui est des besoins en chauffage et refroidissement ainsi que de la consommation du ventilateur, des équations existent pour effectuer ces calculs mais il faudrait également :

- Des mesures sur site effectuées sur différents bâtiments avec différents climats, systèmes de ventilation, etc. afin de convaincre les parties prenantes de l'impact de l'étanchéité à l'air des réseaux
- Améliorer les calculs énergétiques réglementaires pour s'assurer que l'impact des fuites dans les réseaux soient correctement pris en compte. Sans de tels calculs corrects, les concepteurs ne verront pas l'intérêt d'améliorer l'étanchéité à l'air des réseaux.

Des recherches sont également nécessaires pour quantifier l'impact des fuites dans les réseaux sur d'autres aspects tels que le bruit, l'encrassement, la qualité d'air intérieur, etc.

L'amélioration de l'étanchéité à l'air des réseaux met également en évidence le besoin d'améliorer le protocole de mesure.

De plus, en ce qui concerne l'étanchéité à l'air des bâtiments, il est important :

- d'accroître nos connaissances sur l'incertitude du test et la réduire;
- d'avoir un protocole international unique et homogène (et non divisé en plusieurs normes).

8 Remerciements

L'AIVC et les auteurs tiennent à remercier la plateforme [TightVent Europe](#) pour ses activités en lien avec l'étanchéité à l'air des réseaux, et en particulier le comité [TAAC](#) (TightVent Airtightness Associations Committee).



Un grand merci également à MapClim et Nolwenn Hurel pour leurs contributions pour la traduction du document en français.



9 Références

[1] Feasibility study of ventilation system airtightness. Soenens, Jeroen and Pattijn, Pedro. Brussels, Belgium: AIVC, 2011. Proceedings of the 32nd AIVC & 1st TightVent Conference, 12-13 October. pp. 51-54.

[2] Class C air-tightness: proven ROI in black and white. Stroo, Peter. Brussels, Belgium: AIVC, 2011. Proceedings of the 32nd AIVC & 1st TightVent Conference, 12-13 October. pp. 96-97.

[3] Ductwork airtightness: reliability of measurements and impact on ventilation flowrate and fan energy consumption.

Berthault, Sylvain, Boithias, Florent and Leprince, Valérie. Poznan: AIVC, 2014. Proceedings of the 35th AIVC-4th TightVent-2nd venticool Conference, 24-25 September. pp. 478-487.

[4] Case study: Effect of excessive duct leakage in a large pharmaceutical plant. Dyer, David F. Brussels, Belgium: AIVC, 2011. Proceedings of the 32nd AIVC & 1st TightVent Conference, 12-13 October. pp. 55-56.

[5] Impact of a poor quality of ventilation systems on the energy efficiency for energy-efficient houses. Bailly, Adeline, Duboscq, Franck and Jobert, Romuald. Poznan, Poland: AIVC, 2014. Proceedings of the 35th AIVC-4th TightVent-2nd venticool Conference, 24-25 September. pp. 108-118.

[6] Effects of airflow infiltration on the thermal performance of internally insulated ducts. Levinson, Brennen, et al. 2000, Energy and Buildings 32(3), pp. 345-354.

[7] Duct leakage in European buildings: status and perspectives. Carrié, François Rémi, et al. 2000, Energy and Buildings, Vol. 32, pp. 235–243.

[8] Impacts of duct leakage on central outdoor-air conditioning for commercial-building VAV systems. Krishnamoorthy, Sreenidhi and Modera, Mark. 2016, Energy and Buildings, Vol. 119, pp. 340–351.

[9] Impact of ductwork airtightness on fan energy use: Calculation model and test case. Leprince, Valérie and Carrié, François Rémi. 2018, Energy & Buildings, Vol. 176, pp. 287–295.

[10] Building and ductwork airtightness requirements in Europe – Comparison of 10 European countries. Leprince, Valérie, Carrié, François Rémi and Kapsalaki, Maria. Nottingham : AIVC, 2017. Proceedings of the 38th AIVC Conference "Ventilating healthy low-energy buildings", Nottingham, UK, 13-14 September 2017. pp. 192-201.

[11] Statistical analysis of about 1,300 ductwork airtightness measurements in new French buildings: impacts of the type of ducts and ventilation systems. Moujalled, Bassam, Leprince, Valerie and Mélois, Adeline. Juan-

Les-Pins, France: AIVC, 2018. Proceedings of the 39th AIVC-7th TightVent-5th venticool Conference, 18-19 September. pp. 222-229.

[12] Airtightness of ventilation ducts. Delmotte, Christophe. 2003, Ventilation Information Paper n°1 - AIVC.

[13] Ductwork design flaws and poor airtightness: a case study about a ventilation system reconditioning in a sealed building. Richieri, Fabrice, et al. Juan-Les-Pins, France: AIVC, 2018. Proceedings of the 39th AIVC-7th TightVent-5th venticool Conference, 18-19 September. pp. 442-451.

[14] Impact of ductwork leakage on the fan energy use and sound production of central mechanical ventilation units in houses. Leprince, Valérie, Lightfoot, Marcus and de Jong, Jelmer. Ghent: 2019. 40th AIVC conference.

[15] Fixing duct leaks in commercial buildings. Modera, Mark. 2005, ASHRAE journal, pp. 22-28.

[16] Energy performance of buildings - Ventilation of buildings - Part 5-1: Calculation methods for energy requirements of ventilation and air conditioning systems. CEN. EN 16798-5-1:2016. 2016.

[17] Duct Leakage Modeling in EnergyPlus and Analysis of Energy Savings from Implementing SAV with InCITe. Wray, Craig P. and Sherman, Max H. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.

[18] Measurement of air leakage in air-handling units and air conditioning ducts. Srinivasan, K. 2005, Energy and Buildings, Vol. 37, pp. 273–277.

[19] Impact of ductwork airtightness and conduction losses on heat recovery efficiency. Carrié, F.R. and Leprince, V. Berlin-Adlershof, Germany: euz, 2011. Proceedings of the 6th International BUILDAIR-Symposium.

[20] Stimulation of good building and ductwork airtightness through EPBD. Guyot, Gaëlle and Carrié, Rémi. ASIEPI, 2010.

[21] A Guide to Achieving Significant Energy Use Reduction with Major Renovation Projects (IEA EBC Annex 61, Subtask A). Zhivov, Alexander and Lohse, Rüdiger. New Buildings Institute (NBI), 2017.

[22] OVERVIEW | Right and Tight: What's New in Ductwork and Building Airtightness?. Leprince, Valérie, Kapsalaki, Maria and Carrié, François Rémi. BUILD UP. [Online] 2 October 2017.
<http://www.buildup.eu/en/news/overview-right-and-tight-whats-new-ductwork-and-building-airtightness-1>.

[23] Duct leakage testing in Portugal, a consulting engineer view and experience. Lisboa, Carlos. Juan-Les-Pins, France: AIVC, 2018. Proceedings of the 39th AIVC-7th TightVent-5th venticool Conference, 18-19 September. pp. 216-217.

[24] BESA. DW/143: Ductwork air leakage testing. London: Building Engineering Services Association, 2013.

[25]. Can we learn from the Swedish quality approach to ductwork airtightness and the regular inspection of ventilation systems? Andersson, Johnny. Brussels, Belgium: AIVC, 2012. Proceedings of the International workshop: Achieving relevant and durable airtightness levels: status, options and progress needed, 28-29 March 2012. pp. 95-101.

[26] Duct system air leakage – How Scandinavia tackled the problem. Schild, P.G. and Railio, J. BUILD UP. [Online] 1 September 2009.
http://www.buildup.eu/sites/default/files/content/P187_Duct_System_Air_Leakage_ASIEPI_WP5.pdf.

[27] Building Envelope and Duct Airtightness of New US Dwellings. Chan, Wanyu R. and Sherman, Max H. ASHRAE, 2013. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference.

[28] Improving Ductwork - A Time for Tighter Air Distribution Systems, Report. Carrié, F.R., Andersson, J. and Wouters, P., [ed.]. ISBN 1902177104. Brussels: EU Project SAVE-DUCT, 1999.

[29] Field experience with sealing large building duct leakage with an aerosol based sealing process. Modera, Mark. Washington: AIVC, 2013. Proceedings of the Workshop on Building and Ductwork Airtightness Design, Implementation, Control and Durability: Feedback from Practice and Perspectives, 18-19 April.

[30] Duct leakage repeatability testing. Walker, Iain and Sherman, Max. Lawrence Berkeley National Lab, 2014.

[31] ASTM E1554. ASTM E1554 / E1554M-13, Standard Test Methods for Determining Air Leakage of Air Distribution Systems by Fan Pressurization. Washington DC: ASTM International, 2018.

[32] RESNET 380. ANSI/RESNET/ICC 380. Standard for Testing Airtightness of Building, Dwelling Unit, and Sleeping Unit Enclosures; Airtightness of Heating and Cooling Air Distribution Systems; and Airflow of Mechanical Ventilation Systems. ICC & RESNET, 2019.

[33] ANSI/ASHRAE Standard 152. ANSI/ASHRAE Standard 152. Method of Test for Determining the Design and Seasonal Efficiencies of Residential Thermal Distribution Systems. Atlanta, GA: ASHRAE, 2014.

[34] SMACNA. HVAC AIR DUCT LEAKAGE TEST MANUAL. Chantilly: Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association Inc. , 1985.

[35] Duct systems in large commercial buildings: physical characterization, air leakage, and heat conduction gains. Fisk , William J. , et al. 2000, Energy and Buildings, Vol. 32, pp. 109–119.

[36] Improving Building Envelope and Duct Airtightness of US Dwellings - the Current State of Energy Retrofits. Chan, Wanyu R and Sherman, Max H. Washington: AIVC, 2013. Proceedings of the Workshop on Building and Ductwork Airtightness Design, Implementation, Control and Durability: Feedback from Practice and Perspectives, 18-19 April.

[37] Duct Leakage Repeatability Testing. Walker, I. S., Sherman, M. H. and Francisco, P. F. Clearwater Beach: ASHRAE/DOE/BTECC, 2016. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII.

[38] About 1,000 ductwork airtightness measurements performed in new French buildings: database creation and first analyses. Bailly Mélois, Adeline and Moujalled, Bassam. Nottingham, UK: AIVC, 2017. Proceedings of the 38th AIVC-6th TightVent-4th venticool Conference, 13-14 September. pp. 310-318.

[39] Source book for efficient air duct systems in Europe. Malmstrom, T, et al. AIRWAYS project, 2002.

[40] Airtight ductwork - The Scandinavian success story. Schild, Peter G. and Railio, Jorma. REHVA. [Online] 2011. <https://www.rehva.eu/publications-and-resources/rehva-journal/2011/022011/airtight-ductwork-the-scandinavian-success-story.html>

[41] CEN. European Standard EN 12237:2003. Ventilation for buildings - Ductwork - Strength and leakage of circular sheet metal ducts. CEN, 2003.

[42] EN 1507:2006 Ventilation for buildings - Sheet metal air ducts with rectangular section Requirements for strength and leakage. CEN, 2006.

[43] Sealing ducts in large commercial buildings with aerosolized sealant particles. Modera, M, et al. 2002, Energy and Buildings 34, pp. 705–714.

[44] Ventilation Ductwork Systems Certification for a Better Air Tightness. Briffaud, Marie-Clémence. Juan-Les-Pins, France: AIVC, 2018. Proceedings of the 39th AIVC-7th TightVent-5th venticool Conference, 18-19 September. pp. 230-236.

[45] Duct Tape Durability Testing. Sherman, M.H and Walker, I.S. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.



The **Air Infiltration and Ventilation Centre** was inaugurated through the International Energy Agency and is funded by the following countries: Australia, Belgium, China, Denmark, France, Greece, Ireland, Italy, Japan, Netherlands, New Zealand, Norway, Republic of Korea, Spain, Sweden, United Kingdom and United States of America.

The Air Infiltration and Ventilation Centre provides technical support in air infiltration and ventilation research and application. The aim is to promote the understanding of the complex behaviour of the air flow in buildings and to advance the effective application of associated energy saving measures in the design of new buildings and the improvement of the existing building stock.