Durabilité de l'étanchéité à l'air des bâtiments

GUIDE N° 3

Caractérisation du vieillissement accéléré en laboratoire des assemblages constructifs

Cerema
PLEIAQ
CETIE Thermographie Infrarouge
RESCOLL Société de Recherche
avec le financement de
ADEME
MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Évaluation de la durabilité des produits d'étanchéité dans des conditions contrôlées en laboratoire

Développement et présentation du protocole expérimental

Andrés LITVAK
Cerema Sud-Ouest
Rue Pierre Ramond - CS 60013
33166 Saint Médard en Jalles
FRANCE
andres.litvak@cerema.fr

Fabien ALLÈGRE
RESCOLL
8, Allée Geoffroy Saint-Hilaire
33615 Pessac Cedex
FRANCE
fabien.allegre@rescoll.fr

Bassam MOUJALLED
Cerema Centre-Est
46, rue St Théobald - BP 128
38081 L'Isle d'Abeau Cedex
FRANCE
bassam.moujalled@cerema.fr

Valérie LEPRINCE
PLEIAQ
84 C Avenue de la Libération
69330 Meyzieu
FRANCE
Valerie.leprince@pleiaq.net

Ce guide est une traduction de l'article « Assessment of the durability of airtightness products in laboratory controlled conditions : developpment and presentation of the protocol» présenté lors de la conférence internationale annuelle de l'AIVC le 16 octobre 2019 à Ghent (Belgique).

Ce guide synthétise un travail collectif réalisé dans le cadre du projet de recherche DURABILIT'AIR, lauréat en 2015 de l'appel à projets de recherche « Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020 » de l'ADEME. Ce projet est soutenu financièrement par l'ADEME (selon la convention n° 1504C0106) et la DHUP (DGALN, Ministère de la Transition Écologique et Solidaire).

Ont participé à ce travail collectif :

Valérie LEPRINCE (PLEIAQ)
Andrés LITVAK (Cerema), coordinateur du projet DURABILIT'AIR
Bassam MOUJALLED (Cerema)
Fabien ALLÈGRE (RESCOLL), coordinateur de la tâche 3
William FAURE (RESCOLL)
Damien LOUET (Cerema), coordinateur de la tâche 3
Sylvain BERTHAULT (Cerema)
Gilles FRANCES (CETII)
Romuald JOBERT (Cerema)

Résumé

L'étanchéité à l'air des bâtiments neufs s'est considérablement améliorée au cours des deux dernières décennies grâce aux règlements sur la performance énergétique des bâtiments. Toutefois, on dispose encore de peu de connaissances sur l'évolution de l'étanchéité de l'enveloppe des bâtiments. Ce travail porte sur la durabilité de l'étanchéité des bâtiments et se concentre sur les façons de mieux la caractériser. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de recherche français « Durabilit'Air » (2016-2019) qui vise à améliorer nos connaissances sur la variation de l'étanchéité de l'enveloppe des bâtiments par mesure sur site et vieillissement accéléré en laboratoire dans des conditions contrôlées.

Ce guide se concentre sur l'évaluation de la durabilité des produits d'étanchéité à l'air dans des conditions contrôlées par le développement d'un protocole expérimental pour la caractérisation en laboratoire du vieillissement accéléré des produits d'étanchéité assemblés des bâtiments. L'objectif global est de définir et de développer un protocole expérimental capable de tester et de quantifier l'évolution de l'étanchéité à l'air des échantillons de produits d'étanchéité assemblés et de comparer le vieillissement relatif des échantillons.

L'état de l'art présenté dans le guide Durabilit'Air n°1 a montré qu'il n'existe pas de protocole universel normalisé pour caractériser, dans des conditions contrôlées en laboratoire, la durabilité des assemblages de produits en ce qui concerne les performances d'étanchéité à l'air. En fait, en raison de la diversité des produits d'étanchéité à l'air, il est difficile – voire impossible – de définir un protocole universel de vieillissement accéléré qui serait équivalent à un nombre connu d'années de vieillissement naturel. A la lumière des résultats de l'état de l'art, nous avons défini les conditions d'exposition d'un essai de vieillissement relatif, à travers des cycles d'exposition thermique, d'humidité et de pression. Nous avons mis au point une chambre environnementale de 1 m^3 et exposé trois échantillons différents de 1 m^2 de produits assemblés aux cycles de conditions d'exposition définis.

Les échantillons testés représentent trois traitements différents de l'étanchéité à l'air des joints entre les menuiseries et les murs : 1) pose en applique avec mousse expansive; 2) pose en applique avec fond de joint et mastic; 3) pose en applique avec complexe d'adhésif et de membrane. Au cours de chaque cycle d'exposition, nous avons mesuré l'évolution de l'étanchéité de l'échantillon.

Les essais de vieillissement des échantillons 2 et 3 ont montré une dégradation significative de l'étanchéité à l'air après le cycle de vieillissement, alors que la perméabilité à l'air de l'échantillon 1 n'a pu être évaluée par notre protocole expérimental. Le choix des échantillons et les conditions expérimentales sont décrits et discutés. Nous concluons que la modification de la durée et des caractéristiques des cycles d'exposition (humidité, température et pression) permettrait certainement de différencier davantage les résultats dans les futurs travaux.

Mots-clés

Étanchéité à l'air,
Mesures en laboratoire,
Vieillissement accéléré,
Durabilité.

1. Introduction

1.1 Contexte

La compréhension des facteurs favorisant l'étanchéité à l'air des bâtiments est devenue une préoccupation majeure pour les professionnels du secteur de la construction. Des progrès significatifs ont été réalisés, principalement en raison des exigences obligatoires dans de nombreux pays, en particulier avec l'ambition de l'Union Européenne de généraliser des bâtiments à énergie quasi nulle d'ici la fin de 2020. Néanmoins, nous manquons encore aujourd'hui d'expertise sur la durabilité des produits d'étanchéité à moyen et à long terme.

En effet, ce sujet reste très complexe, puisqu'il couvre à la fois (i) la modélisation des mécanismes des charges et des déformations du bâtiment et des produits ; (ii) le vieillissement accéléré dans des conditions contrôlées en laboratoire et (iii) la caractérisation de la performance dans le temps, à partir des résultats des mesures sur le terrain.

1.2 Objectifs

Dans cet article, nous présentons les résultats de ce deuxième objectif, qui a été étudié dans le cadre du projet de recherche 2016-2019 de Durabilit'Air (www.durabilitair.com). Nous visons à évaluer la durabilité des produits d'étanchéité à l'air dans des conditions contrôlées pour caractériser le vieillissement accéléré des produits assemblés d'étanchéité à l'air de construction.

L'objectif global est de définir et de développer un protocole expérimental capable de tester et de quantifier l'évolution de l'étanchéité à l'air des échantillons de produits d'étanchéité assemblés et de comparer le vieillissement relatif des échantillons.

Les résultats définitifs des campagnes de mesure sur le terrain à moyen et à long terme du projet Durabilit'Air sont présentés dans le guide Durabilit'Air n°2. Le guide Durabilit'Air n°1 a présenté et discuté de l'état de la technique pour caractériser la durabilité de l'étanchéité à l'air des bâtiments.

A la lumière de l'analyse du vieillissement artificiel en laboratoire, nous avons défini une méthodologie expérimentale et sélectionné trois échantillons de produits d'étanchéité assemblés à tester. L'objectif principal de cette recherche est de prouver la faisabilité technique d'une telle expérience, afin de développer un protocole pour le vieillissement accéléré et l'essai de l'étanchéité des produits assemblés.

2. Méthodologie

2.1 Résultats de l'état de l'art sur le vieillissement artificiel en laboratoire

Dans le guide Durabilit'Air n°1, nous avons présenté une bibliographie des études récentes sur le vieillissement artificiel, dans des conditions de laboratoire contrôlées. Dans cet état de l'art, nous avons souligné l'importance de bien définir l'échantillon à tester (produits d'assemblage v/s produit seul) et les conditions du protocole de vieillissement. En raison de la diversité des produits d'étanchéité à l'air, nous avons conclu qu'il est probablement impossible de définir un protocole universel de vieillissement accéléré qui serait équivalent à un nombre connu d'années de vieillissement naturel.

Une étude a testé la durabilité des adhésifs sur les barrières d'étanchéité extérieures (Langmans, Desta, Alderweireldt et Roels, 2015). Les adhésifs ont été exposés à différents cycles de température (2 semaines), de température, d'humidité et de gel (12 jours) et d'humidité élevée (4 semaines). L'étude a conclu que l'augmentation de la perméabilité à l'air était limitée. Une autre recherche a testé les propriétés des produits seuls et les assemblages de produits mis en œuvre dans une cellule (Ylmén, Hansén et Romild, 2014). Aucune corrélation n'a été observée entre la durabilité du produit seul et la durabilité de l'étanchéité de l'assemblage. Les auteurs ont conclu qu'il est nécessaire de développer des tests de durabilité des systèmes complets d'étanchéité à l'air sur une mise en place à grande échelle. En outre, l'impact

des sollicitations sous pression, humidité et variations de température s'est révélé différent selon le type de barrière d'air : les plâtres sont sensibles à l'humidité et à la température, tandis que les membranes sont sensibles à la variation de la pression (Michaux, Mees, Nguyen et Loncour, 2014). Par conséquent, si l'on veut définir un protocole qui s'appliquerait à tous les types de barrières aériennes, tous les types de contraintes doivent être inclus dans le protocole.

Une étude a mis à l'essai des produits mis en œuvre sur un mur grandeur nature construit sur un cadre en acier de 3 m x 3 m (Antonsson, 2015). Ils ont appliqué un traitement thermique (60°C, 1 semaine) et une charge de pression (-150/+150 Pa) sur l'échantillon avec une chambre climatique et un dispositif de pressurisation intégré au mur. Deux systèmes ont été testés avec ce protocole et des écarts significatifs ont été observés dans les résultats. Avec le premier système, un changement significatif de fuite d'air a été observé après l'exposition thermique, tandis qu'avec le deuxième système très peu de changement a pu être observé.

2.2 Modélisation des mécanismes de charges et de déformations du bâtiment et des produits

Peu d'ouvrages ont étudié la modélisation des mécanismes des charges et des déformations du bâtiment et des produits. Une étude estime que 60 à 75 % des charges de pression peuvent atteindre les produits d'étanchéité à l'air (Ackermann, 2012). L'étude a conclu que la durabilité de la barrière d'air devrait être testée en effectuant des cycles de pression/dépression et en testant la charge maximale.

Elle propose un protocole d'essai représentant 50 ans de cycle de pression du vent (la charge maximale doit être un vent qui se produit une fois tous les 50 ans). À partir du digest BRE, l'étude a établi les cycles de charge à mettre en œuvre en fonction de la charge maximale, ainsi que la simulation des charges maximales. Dans cette étude, des corrélations ont été établies entre le vieillissement artificiel et le vieillissement naturel selon les normes. Néanmoins ces corrélations, basées sur les lois d'Arrhenius, ne sont valables que pour certains types de matériaux.

Pour les assemblages, la loi d'Arrhenius est difficile à utiliser. En effet, l'estimation des charges thermiques et d'humidité est plus difficile et dépend de la position de la barrière d'air.

Les recommandations suivantes ont été formulées pour aborder les risques de changements de phase pendant les essais de vieillissement accéléré en laboratoire :

- différencier les matériaux hygroscopiques des autres matériaux non hygroscopiques parce que l'humidité peut altérer le matériau ;
- prendre en compte l'humidité absolue dans les cycles d'essais de 24h avec adsorption /désorption (chaud humide, chaud sec, froid, ...) ;
- tester les produits conformément aux conditions d'exposition réelles ;
- ne pas dépasser la température de transition vitreuse des produits (T ° de transition de l'état vitreux / solide à l'état pâteux / caoutchouteux). Exemple : mousses en PU : TV = 50 à 60 ° C ;
- ne pas extrapoler la durée de vie des produits testés à un vieillissement accéléré (T ° et HR), à moins que le matériau ne soit testé à température constante, sans changement d'état.

2.3 Principaux résultats

À la lumière de ces travaux, nous avons observé que les résultats des tests de vieillissement varient d'une étude à l'autre. Une des principales raisons est que le protocole n'est pas normalisé. Néanmoins, les conclusions générales suivantes peuvent être tirées :

- La mise en œuvre a une forte incidence sur la durabilité ;
- Les produits n'ont pas la même réaction dans des conditions normales que lorsqu'ils sont soumis à des conditions extrêmes (température, humidité ou pression) ;
- il manque une procédure normalisée pour le vieillissement des mastics pour caractériser les produits et surtout les assemblages en ce qui concerne les performances d'étanchéité à l'air ;

- Les résultats des essais de vieillissement sur les produits seuls ne sont pas nécessairement cohérents avec le vieillissement observé lorsque ces produits sont mis en situation ;
- La performance du produit par rapport aux procédures d'essai classiques (pelage, cisaillement, etc.) ne correspond pas nécessairement à leur performance en termes d'étanchéité à l'air ;
- La stratégie de vieillissement doit être compatible avec les charges des produits. La stratégie peut différer selon la position de la barrière d'étanchéité à l'air.

3. Description du protocole expérimental

Sur la base de cette analyse, nous avons développé un protocole expérimental pour un vieillissement accéléré des assemblages de produits d'étanchéité à l'air. Le protocole consiste à :

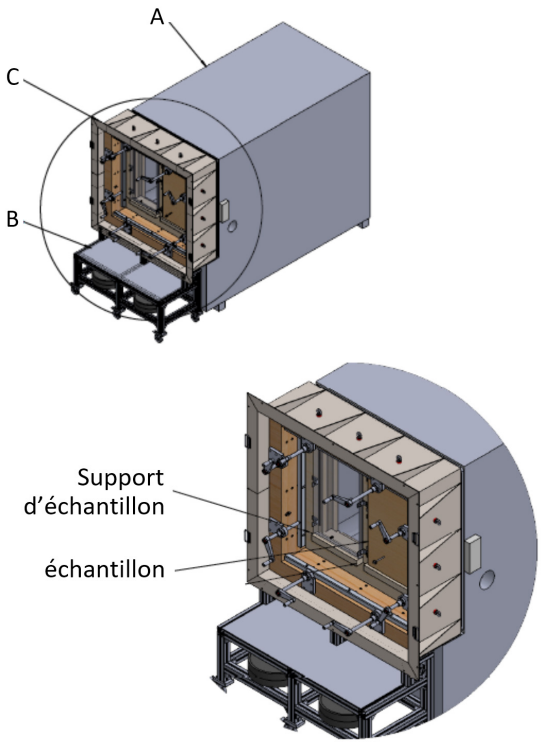
1) mettre au point une chambre expérimentale ;
2) choisir les échantillons représentatifs ;
3) définir les conditions de vieillissement accéléré.

3.1 Chambre expérimentale

Pour notre étude, nous avons développé une chambre environnementale de 1 m^3 pour exposer un échantillon carré de 1 m^2 de produits d'étanchéité assemblés aux conditions contrôlées d'exposition (thermique, hygrométrique et de pression). La chambre environnementale est composée de trois parties principales :

- Une chambre d'exposition accélérée (voir A sur la figure ci-dessous) ;
- Un banc d'essai de pression pour la mesure de l'exposition à la pression différentielle et de l'étanchéité à l'air (voir la figure B ci-dessous) ;
- Un porte-échantillon, entre les deux enceintes (voir C sur la figure ci-dessous).

Figure 1 : chambre expérimentale ENCT 1016



Le châssis du porte-échantillon et le banc de pression différentielle constituent une seule pièce indépendante qui permet d'effectuer des cycles de vent et des mesures d'étanchéité entre -250 Pa et + 250 Pa.

Nous avons créé une pression différentielle sur l'échantillon par de l'air pressurisé positif et négatif, avec des régulateurs de débit massique d'air. La pressurisation a créé les conditions pour les essais d'exposition (à l'exposition au vent) et d'étanchéité à l'air.

Figure 2a : vue globale avec le panneau d'accès au banc sous pression fermé par une plaque d'aluminium

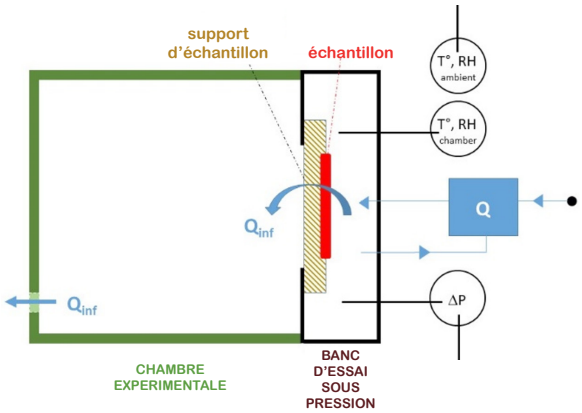


Figure 2b : la chambre expérimentale (la porte a été enlevée)

Figure 2c : support d'échantillon

Spécifications techniques	Valeurs
Plage de mesure de pression différentiel	[-250 Pa , +250 Pa]
Stabilité Pdiff en régiment permanent	± 2 Pa dans [-250 Pa ,+250 Pa]
Dépassement de consigne maximal	<30% (à 10 Pa) <5% (≤ -50 Pa et ≥50 Pa)
Capacité de compensation maximale	30 l/min [0 , 250 Pa] 20 l/min [- 250 Pa , 0 Pa]
Précision mesure de pression	± 0.25% dans la plage de mesure
Plage de mesure de débit	[-50 l/min , 50 l/min]
Précision de mesure de débit	± 0.6% dans la plage de mesure
Données collectées	Pression différentielle Débit volumétrique T°C/RH laboratoire T°C chambre d'essais Pression atm laboratoire
Fréquence d'enregistrement	5 Hz

Tableau 1 : spécifications techniques du banc d'essai sous pression

Nous avons conçu les spécifications techniques du banc d'essai sous pression (voir tableau 1) en vue d'obtenir le meilleur compromis entre une bonne stabilité du signal et une plage d'utilisation assez large, afin de tester les différentes solutions d'implémentation et de maintenir une réactivité de contrôle et un débit suffisant pour réaliser des cycles à fréquence imposée.

Des essais d'étanchéité à l'air, de répétabilité et de reproductibilité ont été effectués sur le banc dans quatre configurations différentes :

1) test i : avec une plaque hermétique d'aluminium, fermant le banc de pression

2) test ii : avec une plaque d'aluminium percée d'un trou rond de ø 2.5 mm

3) test iii : avec une plaque d'aluminium percée d'un trou rond de ø 4 mm

4) test iv : avec une plaque d'aluminium percée de deux trous (ø 2.5 mm et ø 4.0 mm)

Les résultats ont confirmé l'étanchéité du banc. Les débits d'air d'étanchéité mesurés étaient inférieurs à la précision de mesure du débit d'air (0,18 l/min pour la pression positive et 0,12 l/min pour la pression négative). Inversement, les mesures du débit d'air en fonction de la pression pour la configuration n°ii-iii-iv (avec des trous) ont montré des résultats cohérents

avec les essais correspondants de surface de fuite équivalente.

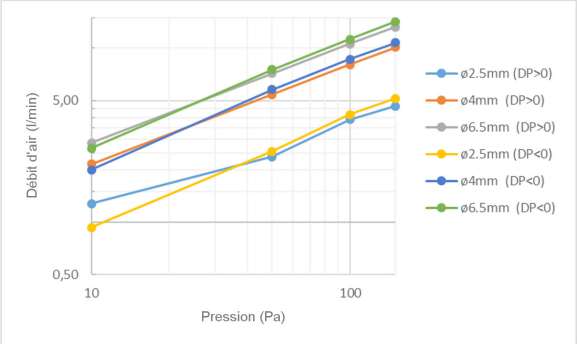


Figure 3 : débits de fuite sur la plaque d'aluminium (tests n° ii - iii - iv)

3.2 Cycles d'exposition et mesures de l'étanchéité à l'air

Nous avons défini un essai comme 4 cycles successifs appliqués l'un après l'autre avec des mesures intermédiaires pour contrôler l'évolution de l'étanchéité entre chaque cycle. Nous avons conçu 4 cycles d'exposition afin d'accélérer le vieillissement des échantillons (voir figure 4 ci-contre).

Des mesures de l'étanchéité à l'air ont été effectuées afin de déterminer le débit d'air Q en fonction de la pression ΔP, selon le modèle du débit d'air et de la loi de pression, équation 1 :

$$Q = K \Delta P^n$$

où Q (l/min) est le débit d'air, ΔP(Pa) est la pression différentielle et K(l/min.Pa^{-n}) et n(-) sont les coefficients de débit d'air.

Pour ce travail, nous avons comparé les valeurs mesurées des débits d'air à 0 Pa, ± 10 Pa, ± 50 Pa, ± 100 Pa et ± 150 Pa et représenté le graphique correspondant (Q, ΔP).

Pour les charges de pression à appliquer, nous avons transposé le protocole d'Ackerman en France. Le vent maximal mesuré en France en zone habitée est de 150 km/h ce qui correspond à 41 m/s.

Selon la norme ISO 15927-1:2003 : « Performance hygrothermique des bâtiments – calcul et présentation des données climatiques – partie 1 : Moyens mensuels d'éléments météorologiques uniques », le vent sur place est défini par l'équation:

$$vs = vr * Cr * Ct$$

avec :

vs (m/s) la vitesse du vent sur site
vr (m/s) la vitesse du vent de référence
Cr (-) le coefficient de rugosité en zone urbaine, pour une hauteur inférieure à 16 m:
CR(z)=0.24*ln(16/1)
Ct (-) le coefficient de topographie Ct = 0.9

Par conséquent, un vent de 41 m/s représente un vent de 24 m/s sur le chantier. Si l'on considère que le coefficient de pression maximal sur une façade est de 0,5, cela correspond à une charge de 173 Pa, selon l'équation de la pression du vent.

Si l'on considère l'affirmation d'Ackerman selon laquelle 75 % de la charge se trouve sur la barrière d'étanchéité à l'air, cela signifie que la pression maximale à appliquer est de 130 Pa. Nous avons transposé les cycles BRE, voir tableau 2. On peut noter que ces pressions correspondent aux gammes de pression d'un protocole expérimental rapporté dans notre état de l'art précédent (guide Durabilit'Air n°1).

	Nombre de cycles (positifs et négatifs)	Pourcentage de la pression nominale (%)	Pression correspondante (Pa)
séquence à appliquer 5 fois	1	90	117
	960	40	52
	60	60	78
	240	50	65
	5	80	104
	14	70	91
dernière séquence	1	100	130

Tableau 2 : plage des essais de pressions

Figure 4 : cycles successifs appliqués aux échantillons

3.3 Échantillons

Trois types de produits assemblés comme traitements de l'étanchéité des joints entre les fenêtres et les murs ont été choisis comme échantillons à tester, à savoir :

i) mousse expansive ;
ii) fond de joint et mastic ;
iii) membrane et adhésif.

Le porte-échantillon a permis l'installation de deux échantillons différents pour chaque cycle d'exposition. Tous les assemblages ont été réalisés sous la supervision technique des représentants des produits utilisés. La méthode de mise en œuvre a été documentée par ailleurs (Allegre et Louet, 2019).

1) description de l'échantillon n°1 :

ruban de mousse expansive imprégnée sur menuiserie bois

L'échantillon est constitué d'une bande de mousse expansive étanche aux intempéries installée entre le cadre et l'ouverture d'une menuiserie en bois. Le ruban en mousse sélectionné a une plage de mise en œuvre de 5 à 11 mm.

Ce porte-échantillon permet l'installation de deux échantillons en parallèle. Nous avons installé l'échantillon dans deux configurations :

- A gauche dans les figures 4.1 et 4.3, avec une expansion de 10 mm (c'est-à-dire proche de sa limite supérieure)
- A droite dans les figures 4.1 et 4.3, avec une expansion de 6 mm (c'est-à-dire proche de sa limite inférieure)

Figure 4.1 : installation de l'échantillon n°1

Figure 4.2 : installation de l'échantillon n°1

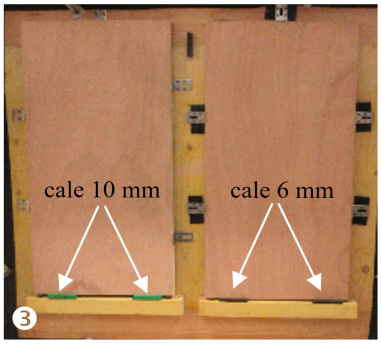


Figure 4.3 : installation de l'échantillon n°1

Figure 4.4 : échantillon n°1

2) description de l'échantillon n°2 :

fond de joint (mousse de renfort) et mastic de scellement sur menuiserie bois

L'échantillon est l'assemblage de bandes de renfort et rempli de mastic comme mastic d'étanchéité, mis en œuvre entre le cadre et l'ouverture d'une menuiserie en bois. Le ruban de mousse de renfort choisi a une plage de mise en œuvre de 5 à 11 mm. Une couche de fixation a été appliquée sur la surface en bois avant de l'appliquer.

Ce porte-échantillon permet l'installation de deux échantillons en parallèle. Nous avons installé l'échantillon dans deux configurations :

- A gauche dans les figures 5.1 et 5.6, avec une expansion de 10 mm (c'est-à-dire proche de sa limite supérieure)
- A droite dans les figures 5.1 et 5.6, avec une expansion de 6 mm (c'est-à-dire proche de sa limite inférieure)

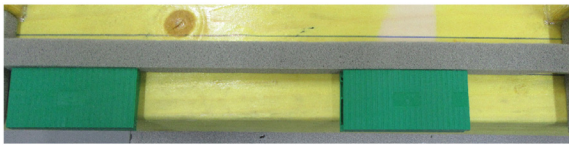


Figure 5.1 : installation de l'échantillon n°2

Étapes successives pour la mise en oeuvre des priduits assemblés. L'ouverture de la menuiserie a été remplacée par une planche en contreplaqué

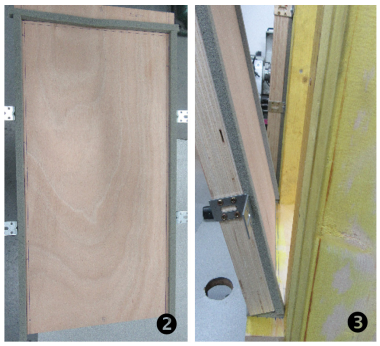


Figure 5.2 et 5.3: installation de l'échantillon n°2

Figure 5.4 et 5.5: installation de l'échantillon n°2

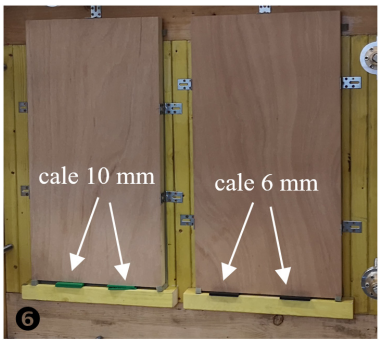


Figure 5.6: installation de l'échantillon n°2

3) description de l'échantillon n°3 : **membrane, ruban adhésif et agrafes sur menuiserie bois**

L'échantillon est l'assemblage d'une membrane collée et agrafée sur l'ouverture d'une menuiserie en bois. Deux membranes identiques ont été mises en place dans le porte-échantillon (figure n°6).

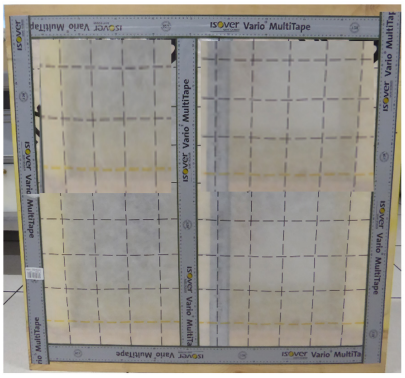


Figure 6 : installation de l'échantillon n°3

- la membrane découpée était positionnée à plat sur le support de l'échantillon à 3 cm du bord du montant gauche et centrée en hauteur
- la membrane a été agrafée sur tous les côtés en plaçant une agrafe tous les 5 cm orientées à 45°
- du ruban adhésif a été collé sur la partie centrale en prenant soin de ne pas le plier

4. Résultats

4.1 Mesures initiales et analyse de l'échantillon n°1

En raison du débit maximal du banc de pression, la pressurisation de l'échantillon n°1 était impossible à atteindre au-delà de 15 Pa pour les pressions positives et négatives (voir tableau 3).

Des essais complémentaires ont été effectués pour confirmer l'étanchéité de l'échantillon et sont documentés ailleurs (Allègre et Louet, 2019).

A partir de la figure 7, nous pouvons observer que les 3 échantillons ont des plages très différentes de perméabilité à l'air pour la mesure initiale (c'est-à-dire avant le début de l'essai de vieillissement).

Avec l'échantillon n°2 comme référence, nous avons évalué à 10 Pa les ratios suivants de perméabilité à l'air :

- $Q_{10\ échantillon1}^{+}/Q_{10\ échantillon2}^{+} = 6.78$ pour les pressions positives et $Q_{10\ échantillon1}^{-}/Q_{10\ échantillon2}^{-} = 5.59$ pour les pressions négatives, extrapolé de l'équation 1 pour l'échantillon 2 et des valeurs mesurées pour l'échantillon 1 ;
- $Q_{10\ échantillon3}^{+}/Q_{10\ échantillon2}^{+} = 0.05$ pour les pressions positives et $Q_{10\ échantillon3}^{-}/Q_{10\ échantillon3}^{-} = 0.08$ pour les pressions négatives, extrapolé de l'équation 1 pour les échantillons 2 et 3.

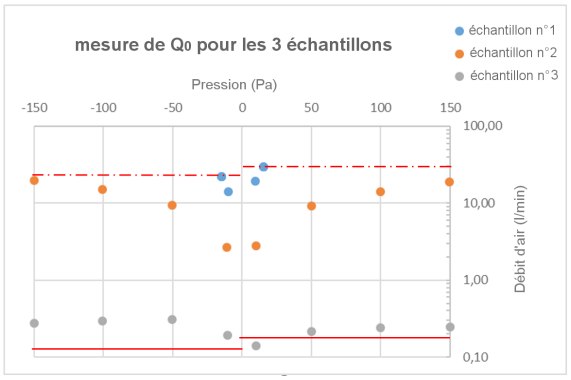


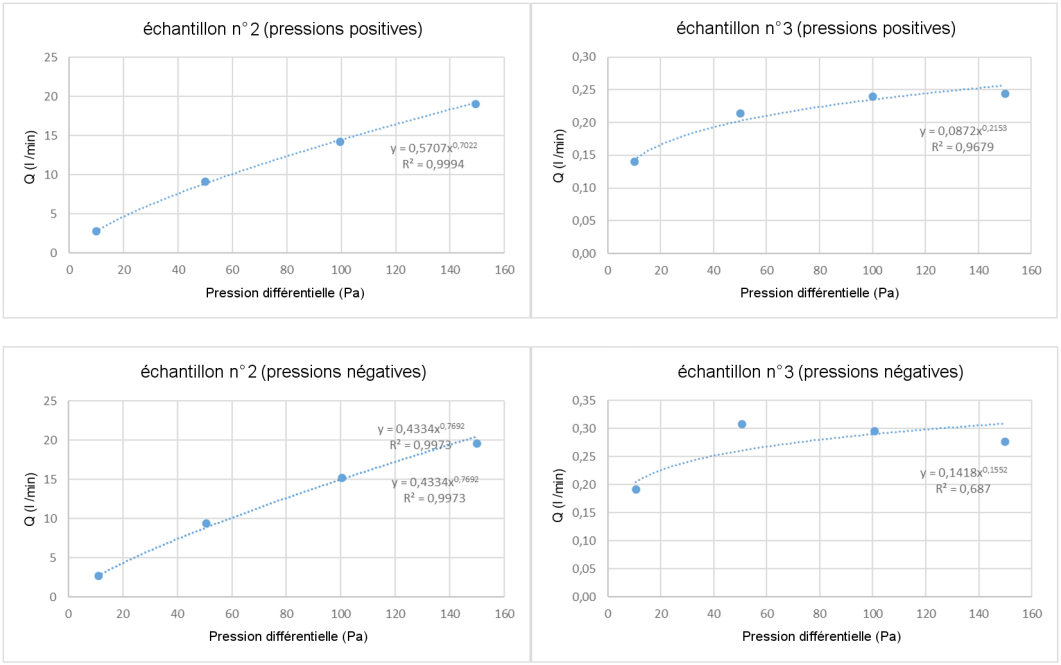
Figure 7 : résultats de la mesure initiale de l'étanchéité à l'air des échantillons, perméabilité en fonction de la pression mesurée. Dans les lignes pointillées rouges, la capacité de compensation maximale (débit d'air) du banc de pression. Dans les lignes lisses rouges, la précision de mesure du débit d'air

Ces résultats ne montrent aucune tendance sur l'impact du mode de pressurisation (positif ou négatif) avec le débit de perméabilité à l'air correspondant.

Tableau 3 : échantillon n°1, mesuré en fonction de la pression cible (Pa)

+150 Pa	+100 Pa	+50 Pa	+10 Pa	0 Pa	-10 Pa	-50 Pa	-100 Pa	-150 Pa
29,6 l/min	29,5 l/min	29,6 l/min	19,4 l/min	0 l/min	14,2 l/min	22,2 l/min	22,2 l/min	22,1 l/min
15,7 Pa	15,7 Pa	15,7 Pa	9,4 Pa	0 Pa	-9,8 Pa	-14,8 Pa	-14,8 Pa	-14,9 Pa

Figure 8 : résultats des débits de perméabilité à l'air pour les échantillons 2 et 3, avant l'essai de vieillissement, et la tendance correspondante selon l'équation 1



4.2 Analyse des résultats de l'échantillon n°2

Le débit de perméabilité à l'air a pu être mesuré sur toute la plage (-150Pa à + 150Pa) pour l'échantillon n°2. Pour chaque cycle, les résultats ont été comparés aux résultats Qtest0 correspondants et ont montré les tendances suivantes (voir figure 9) :

- Amélioration de l'étanchéité entre la mesure Test0 (T0) et la mesure Test1 (T1). Cette amélioration s'explique par la saturation en humidité et donc par l'expansion du cadre en bois.
- En ce qui concerne le T1, nous avons constaté que le T2 présentait une amélioration de l'étanchéité en raison de la saturation en humidité dans le cadre en bois. Nous avons également pu observer que le test T2 n'avait aucune incidence sur les résultats du test T1.
- Bien qu'il soit de faible niveau, le cycle T3 est le premier à détériorer l'étanchéité de l'échantillon. Les augmentations des débits de perméabilité à l'air se situaient entre -3 % (à -150 Pa) et +7 % (à 10 Pa) par rapport à l'essai T0
- La rupture s'est produite après 1h40, ce qui correspond à une température de 120 °C. Nous avons observé une chute soudaine de pression et une saturation de l'écoulement.

  La mesure T4 a été effectuée après stabilisation de l'échantillon et a montré un impact significatif sur l'étanchéité de l'échantillon pour les pressions positives, avec une différence de -22% à +29% de 10 Pa à 150 Pa pour les pressions positives ; pour les pressions négatives, l'augmentation est passée de 0 % (à -150 Pa) à +18 % (à 10 Pa).

Figure 9 : évolution des débits de perméabilité à l'air de l'échantillon n°2 pour le cycle d'altération saisonnier (4 essais : T1, T2, T3, T4)

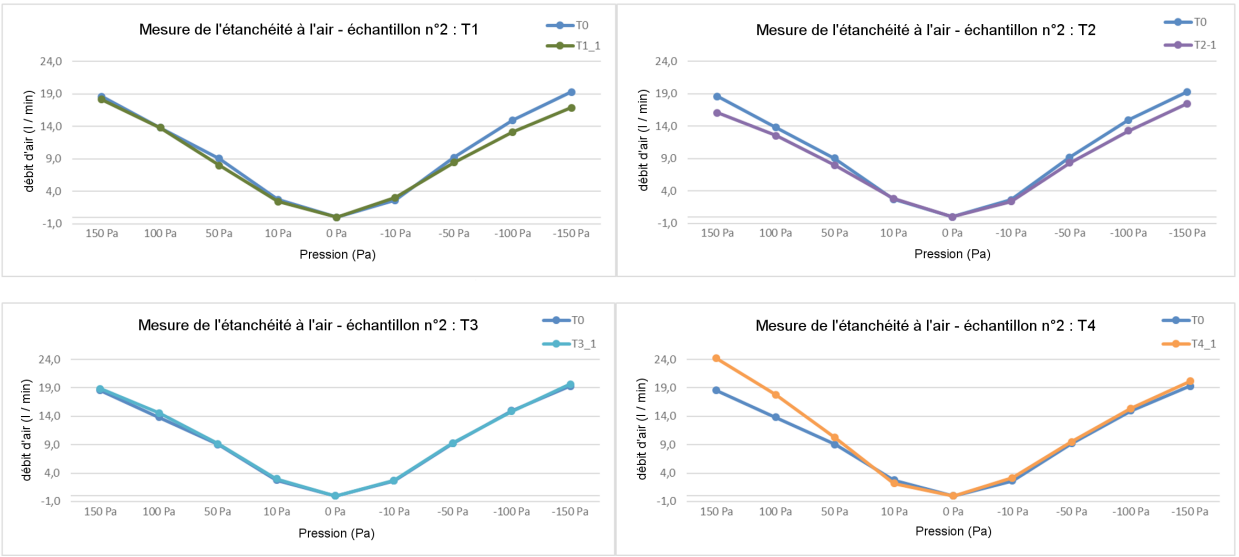


Figure 9 : échantillon n°2, résultats par cycle

Cycle	Température	RH	Pression	Durée	Résultats
T1. Fluage thermique	60 °C	50 %	-50 Pa / +50 Pa	21 h 2 h	amélioration de l'étanchéité entre la mesure T0 et la mesure T1
T2. « 4 saisons »	-10 °C + 15 °C +30 % +5 °C stabilisation	60 % 45 %		24 h 24 h 24 h 24 h 12 h	amélioration de l'étanchéité entre la mesure T0 et la mesure T2
T3. Vent			-150 Pa à + 150 Pa	8 h (3 fois)	bien qu'il soit de faible niveau, le cycle T3 est le premier à déteriorer l'étanchéité de l'échantillon
T4. Point de rupture	+1 °C / min jusqu'à 120 °C		250 Pa	100 min	la rupture s'est produite à 120 °C et a montré une diminution significative de l'étanchéité à l'air de l'échantillon

4.3 Analyse des résultats de l'échantillon n°3

L'échantillon n°3 était très hermétique et donc très sensible aux variations de pression (positives et négatives).
Nous n'avons pas remarqué de détérioration significative des débits de perméabilité à l'air pour les 3 premiers essais du cycle.

Pour l'essai de rupture (essai T4), la rupture s'est produite après 40 min, à la température de 60 °C. Après la rupture, la perméabilité à l'air de l'échantillon semblait augmenter de façon significative pour les pressions négatives : Q_{test4}/Q_{test0} variait d'un facteur de 1,6 à 3,1 selon les pressions mesurées.

Pour les pressions positives, nous avons constaté une augmentation spectaculaire du débit de perméabilité de l'air (Q_4/Q_0 variaient d'un facteur de 56,3 à 10 Pa à 135,7 à 50 Pa ; pour une pression supérieure à 50 Pa, le débit d'air maximal du banc était atteint à 30 l/min).

5. Discussion

Les trois types d'échantillons faits de produits assemblés comme traitements de l'étanchéité à l'air de menuiserie ont montré des résultats très différents, en fonction de la capacité de compensation maximale du débit de perméabilité à l'air du banc.

L'échantillon n°1 (mousse expansive) semblait trop poreux pour notre équipement, tandis que l'échantillon 3 (adhésif et membrane agrafée) semblait trop hermétique.

Figure 10 : observation visuelle des fissures sur l'échantillon n°2 (à gauche, cercles rouges) et des agrafes détachées (à droite, voir cercles rouges) après l'essai de rupture

Pour cette raison, aucun vieillissement artificiel n'a pu être réalisé avec le premier échantillon. Á l'inverse, pour les échantillons n°2 (produit d'étanchéité avec mousse protectrice) et n°3, les observations visuelles après l'essai de vieillissement ont montré la formation de fissures sur l'échantillon 2 et la présence d'agrafes détachées sur l'échantillon n°3, ce qui a entraîné des fuites d'air, voir figure 10.

Les résultats quantitatifs confirment ces observations, avec une légère détérioration de l'étanchéité de l'échantillon n°2 jusqu'à +7%. Néanmoins, bien que les résultats montrent une dégradation significative – voire assez importante, dans certains cas – après le test de rupture de l'échantillon n°2, nous n'avons pu tirer aucune conclusion sur le vieillissement artificiel du protocole, en raison de la température élevée de rupture.
En fait, les conditions expérimentales de l'essai T4 pour l'échantillon n°2 contredisent l'énoncé précédent « Ne jamais tester de produits au-delà des conditions réelles d'exposition des produits » (voir 2.2).

À ce stade, une analyse préliminaire peut être effectuée concernant le protocole expérimental :

- L'amélioration de l'étanchéité à l'air pendant le cycle de vieillissement de l'échantillon 2 est probablement due à l'humidité pour le « test de fluage thermique » et le « test d'altération de l'air » ; c'est pourquoi nous recommandons d'utiliser des matériaux inertes comme porte échantillons pour les travaux futurs ;
- Comme alternative, nous aurions dû étudier l'état initial du porte-échantillon dans des conditions saturées d'humidité à T0 ;
- Il est intéressant de noter que les résultats de mesure sur le terrain (guide Durabilit'Air n°2) aboutissent à des conclusions similaires sur la durabilité de l'étanchéité à l'air sur les maisons de structure en bois, qui ont tendance à améliorer au fil des ans ; probablement en raison de l'expansion du bois avec l'humidité, qui obstruerait les fuites ;
- L'essai 3 d'exposition au vent du cycle de vieillissement de l'échantillon 2 montre une augmentation très modérée de la perméabilité à l'air. Nous pensons que la durée de ce cycle était trop courte, et que des durées d'exposition d'au moins 1000 h (environ 1 mois et demi) devraient être nécessaires; en outre, nous suggérons de tester une pression plus élevée pour représenter des conditions de stress plus élevées que les zones urbaines ;
- Pour l'échantillon 3, il est intéressant de noter que pendant l'essai T1 à 60 °C avec une faible charge de pression, il n'y a pas eu de détérioration en 21 heures, mais pendant l'essai de pause T4 qui s'est produit à 60 °C avec 250 Pa, il a provoqué une rupture en 40 min donc l'interaction des contraintes est critique.

5. CONCLUSIONS

Nous avons mis au point une chambre d'exposition environnementale d'1 m^3 et un protocole expérimental de vieillissement artificiel qui permet de tester des échantillons (1m x 1m) de produits d'étanchéité assemblés, avec une perméabilité maximale à l'air d'environ 1,8 $m^3/h/m^2$ à 150 Pa. La chambre expérimentale peut exposer les échantillons et évaluer leur étanchéité jusqu'à 29 lpm à +250 Pa (respectivement 22 l/min à -250 Pa), dans une plage de température de -30 °C à +180 °C et une humidité de 10 à 95 % (saturation).

Afin de trouver un compromis entre la stabilité du signal, la plage d'utilisation et la réactivité de contrôle du débit d'air, nous avons conçu le banc d'essai sous pression avec des spécifications techniques limitant les capacités du banc d'essai. Nous avons exposé trois échantillons, qui présentaient trois ordres de grandeur de perméabilité à l'air.
Le premier échantillon, nous a empêché d'obtenir la pressurisation du premier échantillon (qui n'était pas assez hermétique). Les essais de vieillissement des échantillons 2 et 3 ont montré une dégradation de l'étanchéité à l'air après le cycle de vieillissement.

Nous n'avons pas pu évaluer l'équivalent artificiel du vieillissement des tests des deux derniers échantillons, car les résultats les plus significatifs

ont été obtenus lors des tests de rupture (cycle n°4). Nous concluons que la modification de la durée et des caractéristiques des cycles d'exposition (humidité, température et pression) permettrait certainement de différencier davantage les résultats dans les futurs travaux. Par conséquent, nous recommandons que des études futures soient menées pour caractériser l'impact de l'humidité et la durée de l'exposition à la pression.

La combinaison de contraintes telles que la température et la haute pression est peut-être aussi à regarder plus en détail, en particulier pour les membranes.

6. Remerciements

Ces travaux ont été soutenus par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et le ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES - DGALN – DHUP). Les opinions des auteurs ne reflètent pas nécessairement celles de l'ADEME et du ministère de la Transition écologique et solidaire. Le matériel publié est distribué sans aucune garantie, explicite ou implicite. La responsabilité de l'interprétation et de l'utilisation du matériel incombe au lecteur. En aucun cas, les auteurs, l'ADEME ou le ministère de la Transition écologique et solidaire ne seront responsables des dommages résultant de son utilisation. Toute responsabilité découlant de l'utilisation de ce rapport incombe à l'utilisateur.

7. Bibliographie

Allègre, F., Louet, D., (2019), Réalisation d'essai de perméabilité à l'air – *Projet DURABILITAIR. RESCOLL (confidential).*

Ackermann, T. (2012). ALTERNATING LOADS – A METHOD FOR TESTING THE DURABILITY OF ADHESIVES IN AIR TIGHTNESS LAYERS.

Antonsson, U. (2015). Utveckling av metodik för verifiering av bestän- dighet hos system för lufttäthet, etapp 1. *Boras: SPSverigesTekniskaForskningsinstitut.*

Langmans, J., Desta, T., Alderweireldt, L., & Roels, S. (2015). Laboratory investigation on the durability of taped joints in exterior air barrier applications. *36th AIVC Conference, Madrid, Spain, 23-24 September 2015 (pp. 615-623). AIVC.*

ISO 15927-1:2003 (2003) "Hygrothermal performance of buildings – calculation and presentation of climatic data – part1: *Monthly means of single meteorological elements", International Organization for Standardization.*

Leprince, V., Moujalled, B., Litvak, A. (2017) Durability of building airtightness, review and analysis of existing studies, *38th AIVC Conference, Nottingham, United Kingdom, September 2017. AIVC.*
*(***Guide Durabilit'Air n°1***).*

Michaux, B., Mees, C., Nguyen, E., & Loncour, X. (2014). Assessment of the durability of the airtightness of building elements via laboratory tests. *35th AIVC Conference, Poznań, Poland, 24-25 September 2014 (pp. 738-746). AIVC.*

Moujalled, B., Berthault, S., Litvak, A., Leprince, A., and Frances, A. (2019) Assessment of long-term and mid-term building airtightness durability: field study of 61 French low energy single-family dwellings, *40th AIVC Conference, Ghent, Belgium, October 2019. AIVC.*

Ylmén, P., Hansén , M., & Romild, J. (2014). Durability of airtightness solutions for. *35th AIVC Conference, Poznań, Poland, 24-25 September 2014 (pp. 268-278). AIVC.*

Conception, réalisation Atelier Infographie - Cerema Sud-Ouest - MCNA / 2019