

Durabilité de l'étanchéité à l'air des bâtiments

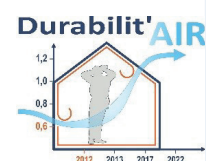


avec le financement de



GUIDE N° 1

Examen et analyse d'études existantes



Durabilité de l'étanchéité à l'air des bâtiments, examen et analyse d'études existantes

Valérie LEPRINCE
PLEIAQ

84 C Avenue de la Libération
69330 Meyzieu
FRANCE

Valerie.leprince@pleiaq.net

Bassam MOUJALLED
CEREMA Centre-Est

46, rue St Théobald - BP 128
38081 L'Isle d'Abeau Cedex
FRANCE

bassam.moujalled@cerema.fr

Andrés LITVAK
CEREMA Sud-Ouest

Rue Pierre Ramond
33165 Saint Médard en Jalles
FRANCE

andres.litvak@cerema.fr

Ce guide est une traduction de l'article « Durability of building airtightness, review and analysis of existing studies », présenté lors de la conférence internationale annuelle de l'AIVC, le 13 septembre 2017 à Nottingham (U.K.). Cet article a reçu le prix du meilleur article de la conférence.

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 Ecologique et Solidaire).

Ont participé à ce travail collectif :

Valérie LEPRINCE (PLEIAQ), coordinatrice de la tâche 1
Andrés LITVAK (Cerema), chef de projet DURABILIT'AIR
Bassam MOUJALLED (Cerema)
Damien LOUET (Cerema)
Sylvain BERTHAULT (Cerema)
Romuald JOBERT (Cerema)
Gilles FRANCES (CETII)
William FAURE (RESCOLL)



Résumé

Les exigences sur l'étanchéité à l'air des bâtiments entrent en vigueur progressivement dans les pays européens, essentiellement en raison de la part de plus en plus importante de l'impact des déperditions de l'enveloppe sur les performances énergétiques globales des bâtiments basse consommation. C'est la raison pour laquelle le niveau d'étanchéité à l'air des bâtiments neufs s'est considérablement amélioré au cours de la dernière décennie.

Cependant, la durabilité de l'étanchéité à l'air des bâtiments, à moyen et long terme reste à ce jour peu maîtrisée.

Le projet de recherche français Durabilit'air vise à améliorer nos connaissances sur le vieillissement des produits d'étanchéité à l'air sur site et dans des conditions contrôlées en laboratoire.

Cette contribution provient du premier volet du projet Durabilit'air : l'« état de l'art ». Elle fait un point complet sur les études menées dans le domaine de la durabilité de l'étanchéité à l'air des bâtiments, prenant essentiellement comme références les publications de l'AIVC ainsi que des études spécifiques au Royaume Uni, en Allemagne, en Suède et en France. Elle traite des mesures sur le terrain, du vieillissement accéléré en laboratoire, des variations saisonnières et des charges auxquelles sont soumis les dispositifs d'étanchéité à l'air.

En ce qui concerne les études de mesures sur le terrain, il semble que l'étanchéité à l'air de l'enveloppe diminue les premières années après la construction, pour se stabiliser ensuite. Le principal résultat de cet inventaire est une liste des éléments essentiels susceptibles d'être à la base des variations d'étanchéité à l'air :

- Incertitudes de mesure observées ;
- Mouvements des structures ;
- Rétractation des enduits au cours des premières semaines, lorsque la maison est chauffée pour la première fois ;
- Percement de la barrière d'étanchéité à l'air en raison de l'installation de nouveaux équipements ;

- Vieillessement de l'assemblage dû à une association défavorable de produits et à de mauvaises conditions de mise en œuvre ;

- et, bien entendu : le vieillissement normal des produits.

De telles informations seront utiles pour les futures campagnes de mesures sur le terrain. Par ailleurs, il est nécessaire de procéder à la détection des fuites et d'effectuer des enquêtes pour expliquer les changements de niveau d'étanchéité à l'air.

L'analyse des études de vieillissement en laboratoire a montré qu'il n'existe effectivement aucun protocole normalisé pour caractériser la durabilité des assemblages de produits. Cependant, en raison de la variété des produits d'étanchéité à l'air, il semble difficile de définir un protocole universel de vieillissement accéléré qui serait équivalent à un nombre d'années de vieillissement naturel connu. Cette contribution donne les avantages et les inconvénients de différentes variantes permettant d'évaluer en laboratoire la durabilité de produits d'étanchéité à l'air.

Mots-clés

Durabilité de l'étanchéité à l'air,

Mesures sur le terrain,

Essais en laboratoire,

Étude bibliographique,

enveloppe de bâtiment.

1. Introduction

Beaucoup de progrès ont été accomplis au cours des trente dernières années pour augmenter nos connaissances sur les mécanismes à la base de l'étanchéité à l'air des bâtiments et sur l'impact des infiltrations d'air sur l'efficacité énergétique, les effets sur la santé et les questions liées à la qualité de la construction. En effet, depuis le début des années 2000, de nombreux pays établissent des réglementations explicites sur l'étanchéité à l'air, parfois avec des spécifications obligatoires, suivant en cela l'ambition de l'Europe qui vise à généraliser les bâtiments à consommation d'énergie quasi-nulle d'ici à la fin 2020. Pourtant, nous manquons d'expertise à l'heure actuelle en matière de durabilité des produits d'étanchéité à l'air, à moyen et long terme. En effet, ce sujet demeure très complexe car il couvre désormais les aspects suivants :

- la modélisation des charges sur le bâtiment et des produits d'étanchéité ;
- le vieillissement accéléré dans des conditions contrôlées en laboratoire ;
- la caractérisation des performances à partir de résultats de mesures sur le terrain.

Avec le projet de recherche DURABILIT' AIR, le consortium constitué par le Cerema, PLEIAQ, CETII et RESCOLL visent à améliorer les connaissances sur diverses questions liées à la durabilité de l'étanchéité à l'air des enveloppes d'immeubles résidentiels. Ce projet qui s'étale sur 36 mois a quatre objectifs majeurs :

1 - lister les principaux constats issus de la recherche internationale en matière de durabilité de l'étanchéité à l'air des produits du bâtiment, grâce à l'état de l'art ;

2 - caractériser l'évolution dans le temps, à moyen et long terme (c'est-à-dire, respectivement, de 1 à 3 ans et de 5 à 10 ans), de l'étanchéité à l'air des maisons individuelles par des campagnes de mesures sur site ;

3 - comprendre et modéliser les mécanismes physiques à l'origine de la dégradation des performances d'étanchéité à l'air en fonction du temps, dans le but de développer une méthode contrôlée en laboratoire afin de tester le

vieillesse accéléré des produits et systèmes sensibles à l'étanchéité à l'air ;

4 - diffuser les principaux résultats de ce travail, au moyen d'outils et de communications auprès des professionnels du secteur du bâtiment afin de promouvoir les bonnes pratiques.

Cette contribution provient du premier volet du projet Durabilit'air : l'« état de l'art ». Elle fait un point complet sur les études menées dans le domaine de la durabilité de l'étanchéité à l'air des bâtiments, prenant essentiellement comme références les publications de l'AIVC ainsi que des études spécifiques au Royaume-Uni, en Allemagne, en Suède et en France. Elle traite des mesures sur le terrain, du vieillissement accéléré en laboratoire, des variations saisonnières et des charges auxquelles sont soumis les dispositifs d'étanchéité à l'air.

2. Approche

Nous avons fait un point complet sur les études et les normes existantes sur la caractérisation de la durabilité de l'étanchéité à l'air des bâtiments. L'objectif était de tirer parti des études précédentes pour élaborer des protocoles en vue des prochaines étapes du projet Durabilit'air :

- caractérisation de l'évolution dans le temps de l'étanchéité à l'air des logements individuels existants, par des mesures sur le terrain ;
- essais de vieillissement accéléré des produits et systèmes d'étanchéité à l'air, dans des conditions contrôlées en laboratoire.

Cet examen a donc porté en priorité sur les études concernant :

- la mesure sur le terrain de l'étanchéité des bâtiments année après année ;
- la variabilité de l'étanchéité à l'air due au responsable des essais, aux appareils de mesure, à des conditions externes, à des variations saisonnières, etc. ;
- les contraintes physiques qui s'exercent sur le dispositif d'étanchéité à l'air ;
- les protocoles expérimentaux destinés à estimer le vieillissement du dispositif d'étanchéité à l'air.

Les performances à long terme en matière d'étanchéité à l'air des bâtiments est un sujet de recherche important depuis la deuxième moitié des années 1980 (essentiellement aux États-Unis et au Canada). Très peu d'études ont été publiées durant les années 1990 et 2000, mais depuis 2010 ce sujet connaît un regain d'intérêt en Europe.

Le présent état de l'art porte principalement sur des études publiées à partir de 1995 pour deux raisons :

- Les habitudes de construction ont changé considérablement durant les 20 dernières années ;
- Les essais d'étanchéité à l'air dans les années 1980 n'étaient pas aussi fiables que maintenant.

Pour des raisons pratiques, l'état de l'art comprend surtout des publications en anglais ou en français.

Dans chaque étude, les résultats présentent une différence significative entre les maisons testées. Dans certaines maisons, la perméabilité est multipliée par un facteur 2 alors que dans d'autres elle diminue au bout de quelques années. La plupart des études se contentent d'une moyenne globale des résultats, sans expliquer les variations entre les maisons.

Des résultats intéressants donnent toutefois des indices permettant d'expliquer ces variations.

Aux États-Unis, (Chan & Sherman, 2014) ont constaté que les infiltrations d'air augmentaient en moyenne de 15 % dans les maisons neuves alors qu'aucune augmentation des fuites d'air n'était relevée dans les maisons isolées. Il a été observé que pour les maisons rénovées, les caractéristiques des joints mis en oeuvre entre les composants du bâtiment n'ont pas varié avec le temps. Dans les constructions neuves, **il est possible que les matériaux à base de bois humide se soient rétractés au bout de quelques années, pouvant alors générer des fuites dans l'enveloppe de l'immeuble.**

En Belgique, (Bracke, Laverge, Van Den Bossche, & Janssens, 2016) ont testé la durabilité sur 15 maisons quasi-identiques : construites par les mêmes artisans avec les mêmes produits (dispositif d'étanchéité à l'air constitué d'un enduit sur la maçonnerie). Pourtant, les résultats du vieillissement varient de -3 % à +120 %, par conséquent dans ce cas le **principal impact** n'est probablement pas dû au vieillissement des produits mais à d'autres facteurs tels que le **comportement des occupants, les incertitudes de mesures, etc.**

Dans l'étude suédoise (Hansen, et al., 2012), il a été difficile de parvenir à des conclusions car les fuites d'air augmentaient pour la moitié des maisons testées (jusqu'à un facteur 6) alors qu'elles diminuaient pour l'autre moitié. Ceci n'était corrélé ni avec des modifications effectuées sur la construction, ni avec l'année de construction.

3. Résultats

3.1 Mesures sur le terrain

















Pays	Nb. de maisons Vert : neuves Bleu : rénovées	Date de const. ou de rénov.	Durée de vieillessement	Perméabilité à l'air moyenne (n ₅₀)	Matériau principal	Evolution de la perméabilité à l'air	Référence
Etats-Unis	17 	2001	10-13 ans	6 ACH 	Bois ?	Max +140% Moy +15% Min -25%	Chan & Sherman, 2014
Etats-Unis	17 	2007	5-7 ans	10 ACH 	Bois ?	Max +150% Moy 0% Min -40%	Chan & Sherman, 2014
Belgique	15 	2010	1-2 ans	0,6 ACH 	Blocs de béton	Max +120% Moy +36% Min -3%	Bracke, Laverge, et al. 2016
Suède	6 	1990	10-20 ans	0,6 ACH à 4 ACH 	Bois ?	Max +580% Moy +162% Min -11%	Hansen & Yimén, 2012
Canada	17 	1985	3 et 11 ans	1,5 ACH 	Bois	Moy +6% Max +60% Moy +11% Min -16%	Prowski, 1998
France	30 	2009	5-6 ans	0,8 ACH 	Blocs de béton	Max - Moy +50% Min -	ADEME, 2016
Allemagne	2 	1990	5 ans	0,6 ACH 	Blocs de béton	MI 1 : 0% MI 2 : +34%	Feist, Ebel, et al., 2016
Royaume- Uni	23 	2007	1-3 ans	4 ACH 	Bois ou blocs de béton	Max +154% Moy +25% Min -33%	Philips, Rogers, et al., 2011

Tableau 1 : Résumé d'études de mesures sur le terrain

Au Canada, (Prowski, 1998) est arrivé à la conclusion que les performances de dispositifs d'étanchéité à l'air en polyéthylène sont restées inchangées pendant 8 à 11 ans. Bien que trois des maisons soient devenues plus perméables, la détection des fuites a montré que celles-ci ne se produisaient pas aux endroits correspondant aux portions en polyéthylène de la barrière d'étanchéité à l'air. À l'inverse, lorsque l'étanchéité est faite au niveau des plaques de plâtre, elle se dégrade légèrement sur la période d'observation (11 ans), sans que l'on puisse démontrer que c'était dû à ce principe d'étanchéité.

En France, (ADEME, 2016), une étude de cas portant sur 30 maisons testées a montré que la perméabilité des maisons en béton (dispositif d'étanchéité à l'air formé de plaques de plâtre) se dégradait plus que celle des maisons en bois (dispositif d'étanchéité à l'air formé d'une membrane). Les résultats sont cependant hétérogènes d'une maison à l'autre. Dans cette étude, un important travail a été accompli pour comparer les localisations des fuites avant et après un certain nombre d'années. Il a été constaté que les fuites se trouvent principalement :

- à la pénétration du dispositif d'étanchéité à l'air ;
- au droit des branchements des appareils électriques ;
- imputables à de nouveaux équipements non étanches à l'air (hotte, éclairage encastré, etc.).

Cependant, aucune corrélation n'a été faite entre la valeur d'étanchéité à l'air et les nouvelles fuites constatées dans les maisons.

En Allemagne, (Feist, et al 2016) ont procédé à une détection approfondie des fuites sur le dispositif d'étanchéité à l'air (formé de plaques de plâtre). Ils ont conclu que seuls les joints d'étanchéité des fenêtres et des portes (sur les ouvertures) s'étaient détériorés. Ils les ont changés pour refaire des essais. **Les enduits acryliques, posés sur fond de joint, ne se sont pas détériorés.**

Au Royaume Uni, (Philips, et al 2011) ont montré dans une étude portant sur 23 logements que la perméabilité à l'air de deux tiers des logements testés avait augmenté alors que la perméabilité à l'air du tiers restant avait diminué.

Ils ont observé ceci :

- Les maisons sont généralement devenues plus perméables que les appartements ;
- Ce sont les logements à ossature bois qui ont présenté les changements les plus importants en termes d'étanchéité à l'air par rapport à la maçonnerie recouverte de plâtre ;
- Six résultats parmi les huit qui ont connu une amélioration des performances étaient chauffés par des panneaux électriques plutôt que par un chauffage au gaz avec des radiateurs (peut-être en raison du nombre réduit de pénétrations de canalisations).

Dans un autre projet au Royaume-Uni, (Wingfield, et al 2009) ont montré qu'**au bout de quelques semaines de chauffage, les enduits commençaient à se rétracter.** Sur 3 maisons, ils ont procédé à des essais avant et après quelques semaines de chauffage et ont observé jusqu'à 30 % d'augmentation de la perméabilité.

Finalement, il est intéressant de noter que, dans pratiquement chacune des études, la perméabilité à l'air d'une partie des logements testés avait diminué. Il y a peu d'explications à cela. Hormis les incertitudes de mesures, cela pourrait provenir d'un tassement, de la mise en oeuvre des finitions de sols après l'essai d'origine et de la présence de fiches dans les prises électriques (Philips, Rogers, & Smith, 2011).

3.2 Incertitudes lors des essais d'étanchéité à l'air

Une partie de la différence constatée entre les résultats des essais peut être imputable aux incertitudes sur les essais d'étanchéité à l'air. Les écarts dans les essais d'étanchéité à l'air sont dus :

- à la prestation du mesureur (y compris la préparation du bâtiment) ;
- à la reproductibilité des essais ;
- à l'impact du vent et des courants d'air thermiques ;
- à l'incertitude des appareils de mesure ;
- aux variations saisonnières de l'étanchéité à l'air

Pour limiter l'impact de la prestation du mesureur, de nombreux pays ont mis au point des qualifications et des normes spécifiques qui, entre autres choses, décrivent la préparation du bâtiment (Leprince & Carrié, 2014). Cependant, (Bracke, et al 2016) ont constaté que de petits changements dans la préparation du bâtiment, comme le fait de fermer ou de ne pas fermer une porte à clé, pouvaient avoir un impact important sur les résultats s'il s'agit de bâtiments très étanches à l'air. De même dans le cas des maisons en bande, en fonction de l'endroit où le dispositif d'étanchéité à l'air est installé, l'état des ouvertures dans les logements mitoyens peut avoir un impact sur le résultat de la mesure.

Différentes études de répétabilité et de reproductibilité des tests de perméabilité à l'air ont été menées au cours des 5 dernières années (Delmotte, et al., 2011), (Bracke, et al., 2013), (Brennan, et al., 2013).

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Le taux moyen de fuites d'air avait un écart-type de répétabilité variant de 3,5 % à 4 Pa à **1,4 % à 50 Pa** (Delmotte et al., 2011), confirmé par (Bracke et al., 2013), (Brennan et al., 2013). Le taux moyen de fuites d'air avait un écart-type de reproductibilité variant de 5,9% à 4 Pa à 2,4 % à 50 Pa (dans des conditions favorables : pas de vent, faible différence de température) (Delmotte et al., 2011).
- La répétabilité et la reproductibilité se sont améliorées lorsque les essais sont effectués à la fois en pressurisation et en dépressurisation (Delmotte et al., 2011), (Bailly et al., 2012).

L'impact du vent sur les incertitudes d'essais d'étanchéité à l'air a été étudié par (Carrié, et al., 2014). L'étude conclut que l'erreur de modèle due au vent sur le débit d'air estimé est relativement faible en haute pression (12 % pour les vitesses de vent allant jusqu'à 10 m/s à 50 Pa), mais qu'elle peut devenir très significative en basse pression (jusqu'à 60 % au point de basse pression (10 Pa)). Par conséquent, lorsqu'on estime l'étanchéité à l'air à 4 Pa, le vent pourrait être responsable d'erreurs significatives (pouvant parfois dépasser 35 %) (Bailly, et al., 2012).

La variation saisonnière de l'étanchéité à l'air des bâtiments est une question en suspens qui a conduit à diverses publications avec des résultats

non homogènes. En Suède, deux maisons à structure de bois très étanches ont été testées comme étant 10 % plus étanches en été qu'en hiver pendant 2 ans (Wahlgren, 2014). Une étude du début des années 1980 avait signalé des variations saisonnières pouvant atteindre un ordre de grandeur de 100 % (Kim & Shaw, 1986). Ceci n'a pas été confirmé par les études récentes. La plupart des études ont toutefois été réalisées sur des bâtiments très étanches à l'air. Les variations ne représentent par conséquent que des débits très faibles.

Par ailleurs, les études des bases de données françaises (Bailly, et al., 2015) et britanniques (site web de l'ATTMA) sur les mesures moyennes mensuelles d'étanchéité ne montrent pas de différence entre l'été et l'hiver.

Les deux bases de données ne contiennent cependant pour l'essentiel que des maisons en parpaings et peu en ossatures bois. Il faudra élaborer d'autres statistiques par type de bâtiment et par climat local pour confirmer ce résultat.

3.3 Essais en laboratoire des dispositifs d'étanchéité à l'air et vieillissement artificiel équivalent

Très peu d'études ont été effectuées pour quantifier les charges sur les dispositifs d'étanchéité à l'air. (Ackermann, 2012) estime que 60 à 75 % des charges de pression atteignent le dispositif d'étanchéité à l'air.

La pression due au vent peut être estimée au moyen de la formule suivante :

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho C_p v^2 \quad (1)$$

avec		
v	m/s	vitesse du vent au niveau du bâtiment
C _p	-	coefficient de pression (jusqu'à 0,5 d'après FprEN 16798-7)
ρ	kg/m ³	masse volumique de l'air

Il est possible de calculer la vitesse du vent au niveau du bâtiment à partir de la vitesse du vent météorologique, conformément à l'ISO 15927-1.

Lorsque la pression maximale est connue sur le dispositif d'étanchéité à l'air, le BRE Digest 346, partie 7, propose des cycles de pression qui représentent 50 ans (ce qui équivaut à 6400 cycles de pression positive/négative).

Il est plus difficile d'estimer les charges thermiques et d'humidité car cela dépend de l'emplacement de la barrière d'étanchéité à l'air. Le Tableau 2 résume les emplacements et les contraintes.

Tableau 2 : Emplacement de la barrière d'étanchéité à l'air et contrainte

Nature du dispositif d'étanchéité à l'air	Membrane, colles et accessoires		Plâtres		Plaques de plâtre, enduit et accessoires	
	à l'extérieur (impossible en France)	Dans l'épaisseur d'isolation (en France, la règle de 1/3 d'isolant au maximum à l'intérieur du dispositif d'étanchéité à l'air s'applique)	À l'intérieur	Sur maçonnerie avec isolation intérieure		Isolation intérieure
Emplacement	à l'extérieur (impossible en France)	Dans l'épaisseur d'isolation (en France, la règle de 1/3 d'isolant au maximum à l'intérieur du dispositif d'étanchéité à l'air s'applique)	À l'intérieur	Sur maçonnerie avec isolation intérieure	Isolation intérieure	À l'intérieur
Contraintes	Cela dépend de son emplacement réel, exposition possible à des températures élevées en cas d'utilisation en réalisation de toitures		Conditions internes	Conditions externes	Conditions internes	Condition interne

Les conditions internes et externes varient d'un pays à l'autre.

(Lamoulie, et al., 2015) ont étudié les conditions hygrométriques d'utilisation de matériaux d'origine biologique pour évaluer leur résistance aux moisissures. D'après cette étude, les conditions hygrométriques habituelles des configurations de toitures et de murs rencontrées habituellement en France peuvent être classées selon deux catégories d'utilisation :

- une catégorie d'utilisation sèche généralement inférieure à une humidité relative (H.R.) de 85 %, avec des conditions d'essais en laboratoire de 85 % H.R. et de 26 °C ;
- une catégorie d'utilisation humide, avec une humidité relative habituelle pouvant être supérieure à 85 % pendant plus de 48 heures, avec des conditions d'essais en laboratoire de 95 % H.R. et de 26 °C.

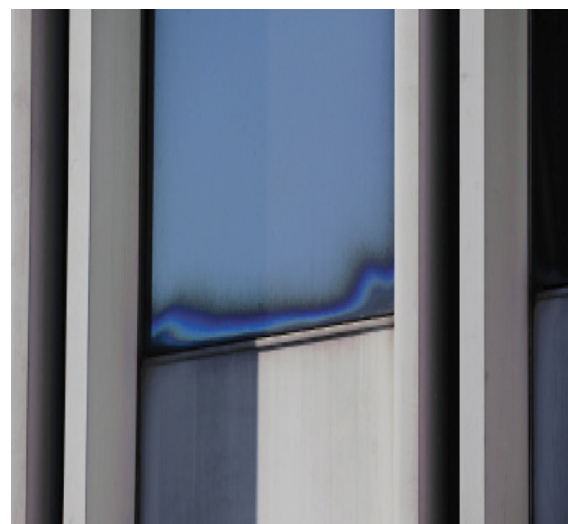
Pour effectuer un vieillissement artificiel lié aux variations de la température, le «principe de superposition temps-température » peut être utilisé. Pour les polymères, le principe réside dans le fait qu'il est possible de trouver un facteur d'équivalence entre le temps et la température. Il est donc possible d'effectuer un vieillissement chimique très rapidement en maintenant un polymère à température élevée (au-dessous de sa température de transition du verre). Ce facteur d'équivalence est souvent calculé en faisant appel au modèle WLF ou à la loi d'Arrhenius. Ce facteur dépend cependant des sollicitations réelles et des matériaux en jeu. L'application de cette loi à l'assemblage reste une question à étudier.

On trouve par conséquent dans la littérature, comme par exemple dans ASTM D3611-89 et SATAS, des informations incohérentes au sujet de l'équivalence entre vieillissement artificiel et vieillissement naturel.

Le principe de superposition temps-température est un vieillissement chimique qui ne crée :

- ni vieillissement physique susceptible d'être induit par une variation d'humidité ;
- ni vieillissement mécanique susceptible d'être induit par des variations de pression.

Cependant, nous ne savons pas si c'est un vieillissement chimique, mécanique ou physique qui prédomine (en ce qui concerne les produits d'étanchéité à l'air). En ce qui concerne les contraintes mécaniques, nous ne savons pas non plus si la pression maximale a, à elle seule, un impact, ou si le nombre de cycles est lui aussi important.



3.4 Vieillessement artificiel

Tableau 3 : Résumé des études de vieillissement artificiel

Pays	Assemblage			Échelle		Contraintes				Critères de vieillissement			Durée de l'essai	Équivalent du vieillissement	Réf.
	Produit seul	2 produits	Mur complet	Échelle réduite	Échelle 1	Charges extrêmes	Cycles	Traitement thermique	Détails	Visuels	Propriétés des matériaux	Étanchéité à l'air			
Belgique		X		X		X			Mise en pression de l'eau			X	45-70 min	?	(Bracke, Van Den Bossche, & Janssens, 2014)
États-Unis (mastics d'étanchéité de gaines)		X			X			X	93 °C, 84 Pa	X		X	2 ans	30 ans	(Sherman & Walker, April 2004)
Suède			X		X		X	X	80 °C, cycles HR	X		X	1 an	50 ans	(Ylmén, Hansén, & Romild, 2014)
Belgique		X		X					15/70 °C Pluie + gel UV + HR			X	8 semaines	?	(Langmans, Desta, Alder-wei-reldt, & Roels, 2015)
Belgique			X		X	X	X		Cycles de pression (jusqu'à 1000 Pa) 20/90 % HR -10/70 °C			X	Visuel	?	(Michaux, Mees, Nguyen, & Loncour, 2014)
Suède			X		X		X	X	-150/150 Pa 60 °C/50 % HR			X	7 jours	?	(Antonsson, 2015)
Norme française	X			X				X	50 °C 70 % HR		X		168 h	?	CSTB, cahier 3710

Michaux et al., dans le cadre du projet DREAM, ont testé plus de 50 murs de bâtiments sous des pressions, des niveaux d'humidités et de températures variables (Michaux, et al., 2014). L'impact de chaque sollicitation était différent en fonction du type d'étanchéité à l'air : les plâtres étaient sensibles à l'humidité et à la température (des fissures sont apparues lorsque le plâtre était trop fin) tandis que les membranes étaient sensibles aux variations de la pression (en raison de la présence des agrafes). Par conséquent, si l'on cherche à définir un protocole qui s'appliquerait à toute sorte de dispositif d'étanchéité à l'air, tous les types de contraintes doivent être compris dans le protocole.

SP (Ylmén, et al., 2014) a testé les propriétés mécaniques de deux produits seuls, ainsi que d'assemblages de produits mis en œuvre dans une cellule. **Il n'a pas été observé de corrélation entre la durabilité des produits seuls (en termes de pelage et déchirement) et la durabilité de l'étanchéité à l'air de l'assemblage.** D'après l'équipe de recherche qui a réalisé l'étude, ceci était dû à :

- des problèmes de compatibilité entre membranes et adhésifs ;
- des différences de résultats pour les échantillons à petite et large échelle ;
- des écoulements d'air apparaissent pendant le traitement thermique entre l'adhésif et la membrane

Par conséquent ils en ont conclu qu'il était nécessaire de mettre au point des essais de durabilité des systèmes d'étanchéité à l'air complets, sur un montage à l'échelle 1.

Conformément aux résultats de ce premier projet de recherche, les chercheurs de SP ont décidé de tester les produits mis en œuvre sur un mur construit sur un cadre en acier de 3 m x 3 m (Antonsson, 2015). Ils ont appliqué (de manière non simultanée) 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 mise en pression montés sur le mur. Deux systèmes ont été testés selon ce protocole et des écarts significatifs ont été observés dans les résultats. Avec le premier système, un changement significatif dans les fuites d'air a été observé après le traitement thermique, tandis qu'il a été constaté très peu de changement sur le second système.

Un autre projet en cours en Suède consiste à tester l'impact des conditions de mise en œuvre de la barrière d'étanchéité à l'air, soit en environnement froid et humide, soit avec de la poussière artificielle projetée sur la membrane avant d'appliquer les colles ou mastics d'étanchéité. Il semble que l'environnement froid (5 °C, 90-95 % H.R.) est très pénalisant même

avant d'appliquer le traitement thermique.

La perméabilité est 5 fois supérieure à ce qu'elle est dans le cas mis en œuvre dans les conditions idéales et 6 fois supérieure à ce qu'elle est après traitement thermique.

Les poussières multiplient environ par 2 la perméabilité à l'air avant et après le traitement thermique.



Figure 1 : mur testé à l'Institut SP (RISE)

4. Discussion

4.1 Vieillesse sur site

Si l'on étudie les mesures effectuées sur site au bout de quelques années, il semble que l'étanchéité à l'air diminue les 3 premières années après achèvement, pour se stabiliser ensuite.

On trouve divers facteurs permettant d'expliquer ce phénomène dans la littérature. D'une part, le vieillissement à court terme peut être dû :

- au chauffage des maisons pour la première fois, pouvant entraîner une rétraction des enduits, si le premier essai est effectué avant le chauffage de la maison l'impact de la rétraction des enduits n'apparaît pas lors du premier essai ;
- à la rétraction des enduits, en l'absence d'utilisation de cordons de fond de joint ;
- à des mouvements de la structure et à un tassement pouvant entraîner l'apparition de fissures dans les joints entre le dispositif d'étanchéité à l'air et les pénétrations (par exemple charpente ou canalisations et plaque de plâtre) ;
- aux percages de l'enveloppe, dont un grand nombre se fait au cours des premières années de la vie d'un bâtiment (pour des meubles de cuisine, une hotte, un four à bois, etc.) ;
- à des conditions de mise en œuvre défavorables pour les colles et les mastics (par temps froid et/ou des conditions poussiéreuses).

D'autre part, il semble que certains produits ne se dégradent pas à long terme (Feist, et al 2016) bien que la durabilité de l'étanchéité à l'air des assemblages se détériore par l'association de produits incompatibles.

Ces explications pour le vieillissement à court terme ne sont pertinentes que lorsqu'une partie de l'étanchéité à l'air est réalisée avec du mastic. Pour la barrière d'étanchéité à l'air au niveau de la membrane ou du plâtre sur maçonnerie, il semble que la durabilité de l'étanchéité à l'air dépende essentiellement du comportement des occupants plus que des produits (Bracke, Laverge, et al 2016) (Prowski, 1998).

Il est donc utile d'associer de futures mesures de terrain avec :

- des questionnaires adressés aux occupants pour connaître les percement effectués dans le dispositif d'étanchéité à l'air après le premier essai et contrôler les conséquences de ces percages par la détection des fuites ;
- une détection des fuites et un examen visuel des assemblages d'étanchéité à l'air visibles, en faisant tout particulièrement attention :
 - aux enduits ;
 - aux pénétrations de la structure du bâtiment à l'intérieur du dispositif d'étanchéité à l'air (charpente, par exemple) ;
- des informations sur :
 - les produits utilisés pour la barrière d'étanchéité à l'air, y compris :
 - l'utilisation éventuelle d'un cordon de fond de joint sous les enduits ;
 - la compatibilité des produits ;
 - les détails de construction ;
 - la période pendant laquelle le dispositif d'étanchéité à l'air a été posé (période de chauffage ou non) ;
 - le fait que le dispositif d'étanchéité à l'air ait été chauffé avant le premier essai.

Les études sur le terrain ont traité un certain nombre de ces aspects. Malheureusement, la corrélation entre les résultats d'étanchéité à l'air et la conclusion de ces analyses n'a pas été étudiée.

4.2 Réduction des incertitudes de mesure

Les recommandations suivantes aideront à réduire la différence entre le premier et le deuxième essai, due aux incertitudes de mesure plus qu'au vieillissement :

- Une personne qualifiée doit effectuer les essais, avec si possible la même personne effectuant les deux tests ;
- Le rapport du premier essai doit décrire avec précision la préparation du bâtiment, y compris les portes extérieures verrouillées et non verrouillées ;

- Les instruments de mesure doivent être étalonnés selon l'ISO 9972 ;
- Les mesures doivent être exécutées sous vent faible ;
- L'étanchéité à l'air doit être comparée à 50 Pa plutôt qu'à 4 ou 10 Pa ;
- La moyenne de la mise en pression et de la dépressurisation devra être utilisée pour servir de base de comparaison ;
- Même si l'impact n'est pas clair, les essais doivent être effectués durant la même saison.

4.3 Vieillessement en laboratoire

Les résultats des études de vieillissement en laboratoire diffèrent les uns des autres. Une des raisons à cela peut être le fait que la non-standardisation du protocole d'essai. Néanmoins, il est possible d'en tirer les conclusions générales suivantes (Langmans, et al., 2015), (Michaux, et al., 2014), (Ylmén, et al., 2014) :

- L'évolution dans le temps des performances d'étanchéité à l'air de l'assemblage ne peut pas être corrélé avec celle des propriétés du matériau (décollement, etc.) ;
- La mise en œuvre a un impact important sur la durabilité ;
- Tous les produits ne réagissent pas de la même manière en conditions extrêmes (température, humidité ou pression extrêmes) ;
- Il manque une procédure standardisée pour le vieillissement artificiel des produits d'étanchéité à l'air pour caractériser les produits et les assemblages ;
- La stratégie de vieillissement doit être cohérente avec la sollicitation exercée sur les produits, la stratégie pouvant différer pour les dispositifs d'étanchéité à l'air extérieurs, intérieurs ou intégrés.

Le problème de la reproductibilité

Nous estimons qu'une bonne reproductibilité est nécessaire pour utiliser un protocole d'essai

dans un contexte de certification.

Dans la plupart des projets, la reproductibilité des protocoles n'a pas été testée. Une difficulté liée aux tests à l'échelle 1 est la reproductibilité du protocole. En effet :

- La qualité de la mise en œuvre peut avoir un impact important sur les résultats du produit ;
- Il revient trop cher de tester le même système plusieurs fois et de prendre la moyenne comme résultat.

Par conséquent, plus l'assemblage est important (grand, avec de nombreux produits), plus il est difficile de garantir la reproductibilité de l'essai.

Le problème des charges simultanées

Dans la plupart des études, l'impact de la charge de vent et celui de la charge thermique sont testés l'un après l'autre. Cela semble approprié si l'on veut estimer l'impact de chacune des contraintes séparément. Cependant il semble intéressant de caractériser le comportement des produits/systèmes soumis au cycle suivant :

- simultanément, chauffage au-dessus de la température de fusion et charge de vent ;
- refroidissement au-dessous de la température de fusion, avec charge de vent.

Ceci nous permettra de voir si la fusion sous contrainte mécanique a un impact ou non sur les performances du système. Il faut noter que, dans ce contexte, la fusion est une transformation réversible, c'est-à-dire que, en l'absence de contrainte mécanique appliquée au produit fondu, celui-ci retourne à son état initial sans détérioration lorsqu'il est refroidi au-dessous de sa température de fusion. L'aptitude des produits à la fusion dépend de leur nature : par exemple les produits thermoplastiques peuvent fondre, alors que ce n'est pas le cas des produits thermodurcissables.

Si le traitement thermique est effectué au-dessus de la température de fusion sans charge de vent, le produit va ramollir durant le traitement mais retournera à son état initial lorsqu'il sera refroidi (phénomène réversible).

Cependant, si l'échantillon est mis sous pression pendant le traitement thermique, puis refroidi selon le cycle proposé ci-dessus, le produit peut rester déformé lors du refroidissement, ce qui peut avoir un impact sur son étanchéité à l'air.

Les limitations pratiques d'une telle approche de charges simultanées sont notamment les suivantes :

- La pression maximale au-dessous de laquelle le dispositif d'étanchéité à l'air peut descendre en étant en même temps à la température maximale est inconnue ;
- Cela complique l'appareillage et la procédure d'essai.

Problème du vieillissement

La plupart des études ne comprennent qu'un traitement thermique, ce qui n'est pas un protocole d'essai de vieillissement (ces traitements thermiques ne prétendent pas être équivalents à un certain nombre d'années).

La définition d'un protocole d'essai de vieillissement chimique pourrait être un objectif pour simuler des durées de vie en service réalistes, par exemple en utilisant la loi d'Arrhenius basée sur l'accélération des réactions chimiques à haute température.

Cependant, il n'est pas sûr qu'on puisse appliquer les lois d'Arrhenius et qu'elles produisent le même vieillissement équivalent pour tous les matériaux (plastiques thermodurcissables, élastomères et thermoplastiques). Pour les thermoplastiques, il est important de ne pas dépasser la température de transition vitreuse afin d'éviter des changements irréversibles qui ne se produisent pas dans la réalité.

De plus, le vieillissement chimique ne convient pas pour représenter le vieillissement physique et mécanique. Pour tenir compte d'un vieillissement mécanique sur 50 ans, il convient probablement de mettre également en œuvre des cycles de vent.

En définitive, il n'est pas sûr qu'il soit possible de mettre au point un protocole d'essai capable de garantir un résultat équivalent à un vieillissement sur 50 ans pour tous les produits.

Étapes de mise au point d'un protocole

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients de diverses variantes pour un protocole.

Tableau 4 : Avantages et inconvénients de diverses variantes de définition d'un protocole

	Produit seul		Assemblage seul (2 produits)		Mur complet	
	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
Assemblage	Simple	Pas de corrélation entre vieillissement du produit et vieillissement des assemblages	Produit mis en œuvre	1/ Impact de la mise en œuvre 2 / Interaction entre les produits	Produit mis en œuvre	1/ Interaction entre les produits 2/ Impact de la mise en œuvre => Reproductibilité ? 3/ Coût de mise en œuvre expérimentale
Échelle	Échelle 1			Échelle réduite		
	Avantages		Inconvénients	Avantages		Inconvénients
	Meilleure représentativité		Coût de mise en œuvre expérimentale	Coût plus faible (utilisation d'étuve existante, etc.)		1/ Les échantillons les plus longs ne réagissent pas comme les plus courts (démonstré pour les adhésifs par (Antonsson, 2015)) 2/ Il peut être difficile de mesurer de très faibles débits.
Contraintes	Charge extrême		Cycles accélérés		Traitement thermique et à l'humidité (vieillissement chimique)	
	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
	Garantie de résistance aux contraintes normales	Non représentatif des contraintes réelles, les produits n'étant pas faits pour résister	Représentatif	1/ À part la charge de pression, difficile de définir des cycles 2/ Dure longtemps	Il existe déjà des étuves	Vieillissement équivalent difficile à déterminer
Application de contraintes	Simultanément			L'une après l'autre		
	Avantages		Inconvénients	Avantages		Inconvénients
	Meilleure représentativité		d'estimer l'impact de chacune Complice l'appareillage	Impact de chacune		On ne voit pas l'impact des phénomènes réversibles
Évaluation du vieillissement	Visuelle		Propriétés du matériau		Étanchéité à l'air	
	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
	Simple, facile à communiquer	1/ Subjectif 2/ Absence de corrélation avec l'étanchéité à l'air	Il existe des normes	Absence de corrélation avec l'étanchéité à l'air	Objectif de l'étude	La mesure de très faibles débits exige des instruments spécifiques.

Les connaissances scientifiques manquent pour mettre au point un protocole et une installation d'essai pour caractériser les performances d'un système d'étanchéité à l'air dans le temps. Des étapes importantes méritent néanmoins d'être soulignées pour de telles recherches :

1) Concevoir l'installation d'essai en tenant compte du fait que :

- a) des échelles réduites peuvent ne pas être représentatives ;
- b) les essais doivent être répétables et reproductibles.

2) Définir les conditions de mise en œuvre (température, humidité relative, zone poussiéreuse, etc.) ;

3) Spécifier les contraintes sur des bases claires et en considérant :

- a) les conditions les plus défavorables auxquelles le dispositif d'étanchéité à l'air est soumis sur le terrain (température maximale et minimale, humidité relative et pression) ;
- b) essais préliminaires destinés à évaluer l'impact le plus important entre conditions défavorables stationnaires et conditions cycliques ;

4) Envisager un préconditionnement des échantillons en mettant la priorité sur la comparaison des produits plutôt que sur le vieillissement effectif. Il est possible de tenir compte des lois applicables au vieillissement chimique, en se souvenant que ces lois sont applicables à des familles de produits spécifiques et aux effets réversibles. L'influence des charges de vent cycliques sur le vieillissement mécanique reste encore à étudier ;

5) Mettre en place des essais préliminaires à petite échelle afin d'évaluer la faisabilité et les résultats. Il convient d'avoir à l'esprit que les caractéristiques des produits (par exemple une bande) peuvent varier considérablement en fonction de la taille de l'échantillon (par exemple une bande peut être bonne sur une installation de 50 cm et mauvaise sur une installation de 3 m).

5. CONCLUSIONS

En ce qui concerne les études de mesures sur le terrain, il semble que l'étanchéité à l'air de l'enveloppe diminue les premières années après la construction, pour se stabiliser ensuite. Les principaux résultats de cet inventaire sont une liste des éléments essentiels susceptibles d'être à la base des variations d'étanchéité à l'air :

- Incertitudes de mesure et comment les réduire ;
- Mouvements des structures ;
- Rétractation des enduits au cours des premières semaines, lorsque la maison est chauffée pour la première fois et/ou en l'absence d'utilisation de cordons de fond de joint ;
- Percement de la barrière d'étanchéité à l'air en raison de l'installation de nouveaux équipements ;
- Vieillessement de l'assemblage dû à une association de produits incompatibles et à de mauvaises conditions de mise en œuvre ;
- Vieillessement normal des produits.

De telles informations seront utiles pour les futures campagnes de mesures sur le terrain. Par ailleurs, il est nécessaire de procéder à une recherche de fuites et à une enquête auprès des occupants, en complément des mesures, pour expliquer l'évolution de l'étanchéité à l'air.

L'analyse des études de vieillissement en laboratoire a montré qu'il n'existe effectivement aucun protocole normalisé pour caractériser la durabilité des assemblages de produits en termes d'étanchéité à l'air. De plus, en raison de la variété des produits d'étanchéité à l'air, il semble difficile de définir un protocole de vieillissement accéléré qui serait équivalent à un certain nombre d'années de vieillissement naturel.

Ce travail donne les avantages et les inconvénients de différentes variantes permettant d'évaluer en laboratoire la durabilité de produits d'étanchéité à l'air. Il insiste en particulier sur deux contraintes opposées portant sur l'échantillon :

- il doit être suffisamment grand et réaliste pour être représentatif ;

- il doit être suffisamment simple pour assurer la reproductibilité de l'essai.

Dans le contexte du projet Durabilit'air, nous envisageons des essais portant sur un simple assemblage d'au maximum 3 produits dans un cadre de 1 m x 1 m compatible avec les étuves existantes. Les contraintes appliquées seront à la fois des cycles de pression et un traitement thermique (sous une contrainte de pression fixe). La durabilité sera évaluée au moyen d'un essai d'étanchéité à l'air.

Ces résultats seront présentés dans le Guide n° 3 - Méthodologie d'essais de vieillissement accéléré en laboratoire de l'étude DURABILIT'AIR.

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.

Les auteurs remercient Ulf Antonsson et Eva Sikander pour leur accueil aux laboratoires du RISE (nouveau nom de SP) à Borås (Suède).

7. Bibliographie

ADEME. (2016). *Quelle pérennité de la perméabilité à l'air des maisons individuelles en Basse Normandie*.

Bailly, A., Guyot, G., & Leprince, V. (2015). 6 years of envelope airtightness measurements performed by French certified operators: analyses of about 65,000 tests. *36th AIVC Conference « Effective ventilation in high performance buildings»*, Madrid, Spain, 23-24 September 2015. (pp. 22-32). AIVC.

Bailly, A., Leprince, V., Guyot, G., Carrié, F., & El Mankibi, M. (2012). Numerical evaluation of airtightness measurement protocols. *33rd AIVC Conference « Optimising Ventilative Cooling and Airtightness for [Nearly] Zero-Energy Buildings, IAQ and Comfort»*, Copenhagen, Denmark, 10-11 October 2012 (pp. 252-255). AIVC.

Bracke, W., Laverge, J., Van Den Bossche, N., & Janssens, A. (2013). Durability and measurement uncertainty of airtightness in extremely airtight dwellings. *34th AIVC Conference « Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials»*, Athens, Greece, 25-26 September 2013 (pp. 524-534). AIVC.

Bracke, W., Laverge, J., Van Den Bossche, N., & Janssens, A. (2016). Durability and Measurement Uncertainty of Airtightness in Extremely Airtight Dwellings. *International Journal of Ventilation*, 383-393.

Carrié, F., & Leprince, V. (2014). Model error due to steady wind in building pressurization tests. *35th AIVC Conference « Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance»*, Poznań, Poland, 24-25 September 2014 (pp. 770-774). AIVC.

Chan, W., & Sherman, M. (2014). Durable airtightness in single-family dwellings: field measurements and analysis. *35th AIVC Conference « Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance»*, Poznań, Poland, 24-25 September 2014 (pp. 7-15). AIVC.

Crowe, K. (1974). *A History of the Original Peoples of Northern Canada*. Montreal: McGill/Queen's University Press for the Arctic Institute of North America.

Feist, W., Ebel, W., Peper, S., Hasper, W., Pfluger, R., & Kirchmair, M. (2016). *25 Jahre Passivhaus Darmstadt Kranichstein*. Darmstadt: PASSIVHAUS INSTITUT.

Hansen, M., & Ylmén, P. (2012). Changes in airtightness for six single family houses after 10-20 years. *TightVent- AIVC International workshop: «Achieving relevant and durable airtightness levels: status, options and progress needed»*, Brussels, Belgium, 28-29 March 2012 (pp. 67-75). AIVC.

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 « Effective ventilation in high performance buildings»*, Madrid, Spain, 23-24 September 2015 (pp. 615-623). AIVC.

Liddament, M. (2012). UK experience with quality approaches for airtight constructions. *TightVent - AIVC International workshop: «Achieving relevant and durable airtightness levels: status, options and progress needed»*, Brussels, Belgium, 28-29 March 2012, (pp. 103-110).

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 « Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance»*, Poznań, Poland, 24-25 September 2014 (pp. 738-746). AIVC.

Philips, T., Rogers, P., & Smith, N. (2011). *Ageing and airtightness How dwelling air permeability changes over time*. Milton Keynes: NHBC foundation.

Prowski, G. (December 6-10, 1998). The variation of airtightness of wood-frame houses over an 11-year period.

Wahlgren, P. (2014). Seasonal variation in airtightness. *35th AIVC Conference « Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance»*, Poznań, Poland, 24-25 September 2014 (pp. 621-628). AIVC.

Ylmén, P., Hansén, M., & Romild, J. (2014). Durability of airtightness solutions for. *35th AIVC Conference « Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance»*, Poznań, Poland, 24-25 September 2014 (pp. 268-278). AIVC.

