

Mesure de l'étanchéité des vitrines d'exposition et d'autres contenants de protection – Bulletin technique 38

Jean Tétreault et Eric Hagan

© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation, 2022

Publié par :

Institut canadien de conservation
Ministère du Patrimoine canadien
1030, chemin Innes
Ottawa (Ontario) K1B 4S7
Canada

N° de catalogue : CH57-3/1-38-2022F-PDF

ISSN 2562-0290

ISBN 978-0-660-42516-0

Also available in English.

Imprimé au Canada

Bulletins techniques de l'ICC

L'Institut canadien de conservation (ICC), situé à Ottawa, publie périodiquement ses Bulletins techniques afin que les conservateurs et les restaurateurs d'objets culturels canadiens ainsi que les spécialistes en soin des collections du monde entier soient informés des principes et des techniques de conservation actuels. Les auteurs seront heureux de recevoir des commentaires.

Résumé

L'objectif du présent Bulletin technique est d'expliquer les avantages liés aux contenants de protection étanches à l'air pour l'exposition et la mise en réserve d'objets appartenant à des collections patrimoniales et de présenter une méthode à employer afin d'évaluer leur rendement. Les contenants de protection bien scellés offrent des seuils de tolérance plus élevés à l'environnement, ce qui permet, bien souvent, d'offrir une protection accrue aux objets vulnérables à un coût raisonnable. Ces contenants constituent une solution très efficace et durable, puisqu'ils permettent de mieux contrôler les agents de détérioration, telles l'humidité relative (HR) et l'infiltration de poussière. Un degré élevé d'étanchéité à l'air réduit la circulation de l'air vers l'intérieur et vers l'extérieur par les points de fuite et limite la diffusion de gaz à travers l'enveloppe du contenant de protection. On mesure souvent cette caractéristique de rendement par le taux de perte d'un gaz traceur, la plupart du temps du dioxyde de carbone (CO₂), à partir d'un contenant de protection. Au cours de la dernière décennie, les enregistreurs de données de surveillance du CO₂ sont devenus plus abordables et plus faciles à utiliser pour accomplir cette tâche. Par conséquent, il est désormais beaucoup plus facile pour la communauté du patrimoine de déterminer l'étanchéité à l'air des vitrines et d'autres contenants de protection.

Le présent Bulletin contient des protocoles détaillés permettant d'évaluer l'étanchéité à l'air des contenants de protection et de détecter les points de fuite. Les lignes directrices qui y sont fournies sont utiles pour évaluer le rendement des contenants de protection existants et comprendre ce qu'il faut demander, ou à quoi il faut s'attendre, lors de l'achat de produits tels que des vitrines d'exposition. De plus, plusieurs études de cas présentent des points de vue précieux concernant l'utilisation de valeurs liées à l'étanchéité à l'air et la justification des protocoles décrits, ainsi que diverses limites et précautions à prendre. Par exemple, un degré d'étanchéité à l'air élevé n'est pas toujours souhaitable pour la préservation des objets, en particulier lorsque des sources d'agents de détérioration se trouvent dans le contenant de protection ou y sont générées.

Auteurs

Jean Tétrault a obtenu une maîtrise en chimie analytique de l'Université de Montréal en 1989 et il travaille depuis comme scientifique principal en conservation à la Division de la conservation préventive de l'ICC. Ses principaux intérêts de recherche portent sur les polluants, les produits d'exposition et de mise en réserve, la dégradation du papier et les contrôles environnementaux passifs dans les collections. Les résultats de ses recherches ont été publiés dans diverses revues avec comité de lecture. Il a présenté plus de 100 séminaires au Canada et en Europe de l'Ouest sur des questions de conservation préventive, notamment sur l'éclairage, les directives en matière de conditions environnementales et les produits d'exposition et de mise en réserve. Jean est l'auteur du livre [*Polluants dans les musées et les archives : évaluation des risques, stratégies de contrôle et*](#)

[gestion de la préservation](#), publié par l'ICC en 2003. Il a également publié des Bulletins techniques traitant des revêtements, des produits utilisés en conservation et du gel de silice. Depuis 1998, il est aussi membre du Groupe de travail sur la pollution de l'air intérieur, qui organise des conférences tous les deux ans.

Eric Hagan a obtenu une maîtrise en génie mécanique et une maîtrise en conservation des œuvres d'art de l'Université Queen's, à Kingston, en Ontario. Il a poursuivi ses recherches postuniversitaires à l'Imperial College London grâce à une bourse de recherche de la galerie Tate et obtenu un doctorat en génie mécanique en 2009 portant sur le comportement mécanique de peintures acryliques utilisées par les artistes. Il travaille depuis à l'ICC, où il est scientifique principal en conservation au sein de la Division de la conservation préventive. Ses activités de recherche récentes portent sur l'étude du comportement mécanique des matériaux d'artistes en fonction du temps, sur l'analyse des dommages causés aux structures en bois au moyen d'essais d'émission acoustique et sur des expériences de résistance à la lumière sur des teintures synthétiques anciennes. Eric fournit également des solutions de conception technique aux établissements du patrimoine canadiens, notamment des supports de contrepoids pour les *Livres du Souvenir* au Parlement et un boîtier à faible teneur en oxygène pour la proclamation de la *Loi constitutionnelle de 1982*. Plus récemment, il a étudié la consommation d'énergie d'installations patrimoniales en fonction du climat local et, pour ce faire, a employé des outils d'analyse de rendement et d'analyse comparative.

Avis de non-responsabilité : Les renseignements contenus dans le présent document s'appuient sur la compréhension actuelle des problèmes soulevés. Les lignes directrices énoncées ne garantissent pas nécessairement une protection complète dans toutes les situations ni une protection contre tous les effets néfastes possibles causés par une HR inadéquate, une température inadéquate et des niveaux inacceptables de polluants dans un musée. L'ICC n'offre aucune garantie à l'égard de toute personne ou de tout établissement qui utilise le protocole de détermination de l'étanchéité à l'air décrit dans le présent Bulletin technique. L'ICC n'assume pas non plus la responsabilité des conséquences découlant de l'utilisation des renseignements contenus dans le présent document.

Table des matières

Liste des abréviations	6
Introduction	7
Mécanismes de fuite	7
Étanchéité à l'air	9
Gaz traceur.....	10
Agents de détérioration	11
Humidité relative	11
Polluants	15
Incendie	19
Lumière et température.....	20
Insectes	20
Eau	20
Vandalisme et vol	20
Détection des points de fuite	21
Examen visuel des interstices	21
Essais à l'aide de morceaux de papier	22
Détection électronique des fuites.....	23
Détermination de l'étanchéité à l'air par la méthode de détection des fuites par gaz traceur.....	25
Le dioxyde de carbone comme gaz traceur	26
Injecteur de gaz traceur.....	26
Surveillance des gaz traceurs et enregistreurs de données	28
Protocole.....	29
Consigner les caractéristiques de la vitrine d'exposition	30
Configuration de l'enregistreur de données de surveillance du CO ₂	30
Injection de gaz.....	31
Durée de l'essai de diminution de la concentration.....	32
Fin de l'enregistrement des données	33
Méthodes de calcul de l'étanchéité à l'air	33
Outil de calcul de l'étanchéité à l'air.....	33
Méthode de diminution de la concentration en deux points.....	33

Méthode de diminution de la concentration en plusieurs points	36
Reproductibilité	37
Rapport sur l'étanchéité à l'air	38
L'étanchéité à l'air comme spécification	39
Études de cas	42
Étude de cas 1 : spécifier une étanchéité à l'air en fonction de l'entretien du gel de silice	42
Étude de cas 2 : risque de corrosion du plomb dans une vitrine d'exposition en chêne	43
Étude de cas 3 : l'effet de la température sur la teneur en CO ₂ à l'équilibre	46
Étude de cas 4 : l'effet d'un ventilateur.....	50
Étude de cas 5 : justification de la durée de l'essai	51
Étude de cas 6 : vitrine d'exposition à compartiments multiples	54
Étude de cas 7 : erreur et reproductibilité.....	58
Remerciements	61
Annexe A : Liste de contrôle de l'étanchéité à l'air.....	61
Annexe B : Loi de Graham	62
Bibliographie.....	64

Liste des abréviations

AIC	American Institute for Conservation
BSI	British Standards Institution
HR	humidité relative
ICC	Institut canadien de conservation
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	Organisation internationale de normalisation
<i>N</i>	étanchéité à l'air (unité : 1/jour ou jour ⁻¹)
NPS	National Park Service des États-Unis
ppb	partie par milliard (par volume)
ppm	partie par million (par volume)
R²	coefficient de détermination multiple
<i>TÉA</i>	taux d'échange d'air (unité : 1/jour ou jour ⁻¹)

Introduction

Un contenant de protection consiste en une structure qui entoure un volume précis d'espace et dans laquelle on place un ou plusieurs objets afin de les protéger contre différents agents de détérioration. Par exemple, on peut penser aux vitrines d'exposition, aux armoires de mise en réserve, aux boîtes, aux sacs en plastique et aux caisses d'expédition. L'étanchéité à l'air est l'une des principales préoccupations en matière de protection contre les agents extérieurs tels que les polluants gazeux, la poussière, les insectes et l'HR. Une mesure précise de ce paramètre permet de prévoir quelles seront les conditions environnementales à l'intérieur d'un contenant de protection et dans quelle mesure les objets seront protégés.

Les établissements du patrimoine demandent de plus en plus des contenants de protection offrant des niveaux spécifiques d'étanchéité à l'air, surtout pour les vitrines d'exposition, et exigent des preuves de leur rendement. Parallèlement, les appareils de surveillance des conditions environnementales sont devenus plus courants et plus abordables pour la communauté muséale. Ainsi, le personnel des musées peut vérifier par lui-même si des améliorations sont nécessaires et peut aussi confirmer si les nouvelles vitrines répondent aux spécifications établies quant à l'étanchéité à l'air.

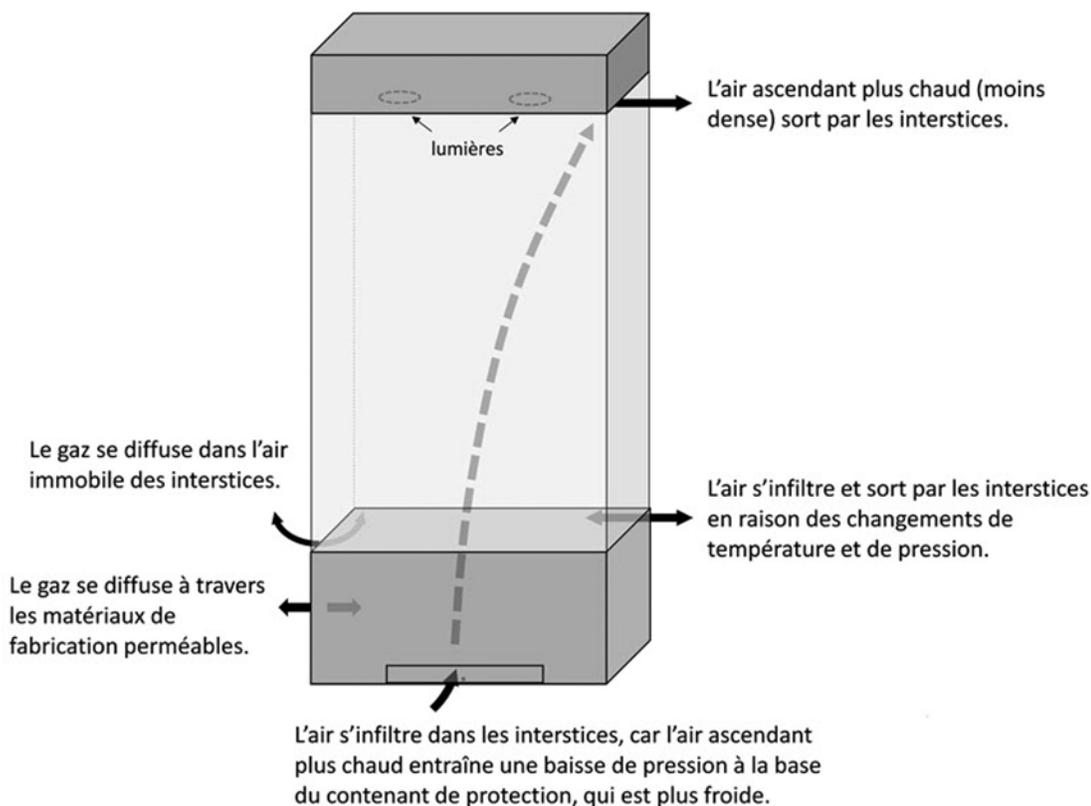
L'objectif de ce Bulletin technique est de fournir une vue d'ensemble des avantages qu'offrent les contenants de protection étanches à l'air pour l'exposition et la mise en réserve d'objets issus de collections patrimoniales et de présenter une méthode pour évaluer leur rendement. Ce Bulletin contient des descriptions des approches courantes servant à mesurer l'étanchéité à l'air ainsi que des outils employés pour localiser les points de fuite. Il fournit également des exemples clairs de facteurs ayant une incidence sur l'étanchéité à l'air. L'accent est mis sur la méthode de quantification de l'étanchéité à l'air à partir de la diminution de la concentration d'un gaz traceur, dans ce cas-ci le CO₂, dont on se sert pour calculer le taux d'échange d'air dans un contenant.

Mécanismes de fuite

Essentiellement, les mécanismes de fuite typiques se divisent en deux catégories :

- le débit d'air (transportant des gaz ou des petites particules) entrant et sortant du contenant de protection en raison des écarts de pression d'air;
- la diffusion de gaz à l'intérieur et à l'extérieur du contenant de protection à travers les matériaux de fabrication ou l'air immobile dans les interstices, les trous ou les coutures.

La figure 1 illustre ces processus pour une vitrine d'exposition :



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0002

Figure 1. Illustration des mécanismes de fuite typiques des vitrines d'exposition : transport de vapeur, de gaz ou de poussière par le débit d'air à travers les interstices et diffusion de gaz à travers les matériaux de fabrication ou l'air immobile dans les petits interstices. Une vitrine d'exposition théorique est représentée; celle-ci comprend une base en bois avec accès pour le sorbant, un vitrage en verre et un compartiment d'éclairage dans la partie supérieure.

Le premier processus, qui fait intervenir un débit d'air, peut être le résultat de changements dans la pression atmosphérique qui font que la pression à l'intérieur du contenant de protection est inférieure ou supérieure à celle de la pièce. Ce phénomène engendre des forces qui poussent l'air à l'intérieur et à l'extérieur du contenant de protection par les interstices, transportant avec lui des gaz ou de petites particules (comme de la vapeur d'eau, des polluants ou de la poussière).

Un petit écart de pression peut également se produire si la température à l'intérieur de la vitrine n'est pas la même que dans la pièce. Par exemple, pendant les heures d'ouverture d'une exposition, l'éclairage peut entraîner une hausse de la température (poussant ainsi l'air vers l'extérieur, par expansion), alors que la température retournera à la normale pendant les heures de fermeture (attirant l'air vers l'intérieur). De même, les variations diurnes de la température dans la pièce peuvent entraîner un écart entre la pression dans le contenant de protection et celle dans la pièce même.

La présence d'un gradient de température à l'intérieur d'une vitrine d'exposition peut également provoquer des fuites d'air en raison de son effet sur la densité et la pression de l'air. Ce phénomène, communément appelé « effet cheminée », peut se produire dans des contenants de protection de grande taille, où l'air chaud moins dense s'élève et entraîne une diminution de la pression à la base du contenant. Cette pression plus faible attire l'air plus frais à travers les interstices autour de la base, tandis que l'air plus chaud sort par les interstices qui se trouvent au sommet. L'humidité est également un facteur dans ce mécanisme de fuite, car l'air humide est plus léger (moins dense) que l'air sec.

Le second processus, qui fait intervenir la diffusion de gaz à travers l'air immobile et les matériaux de fabrication, est généralement plus lent, en particulier à travers les solides. Le taux de transfert à travers les matériaux de fabrication dépend du type et de l'épaisseur du matériau solide, du type de gaz pénétrant ainsi que du gradient de concentration à travers l'enveloppe. La diffusivité d'un gaz particulier à travers un matériau est exprimée par un coefficient de diffusion, qui est déterminé expérimentalement à partir de méthodes d'essai standards. Le présent document n'a pas pour objet d'examiner en détail les mathématiques et la physique de la perméabilité et de la diffusion. Toutefois, certains coefficients de diffusion publiés pour la transmission de la vapeur d'eau à travers des matériaux de fabrication courants sont présentés après conversion en unités et selon une échelle similaires ($\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-12}$) :

- Membrane d'acrylique [poly(méthacrylate de méthyle)] de 0,12 à 0,21 mm d'épaisseur : 1,1 à 1,8 et plus, comme l'a étudié Roussis (1983) et décrit comme étant plus complexe que la simple diffusion en raison de la relaxation du polymère sur de grandes échelles de temps.
- Contreplaqué de hêtre de 25 mm d'épaisseur : 51,6 (Sonderegger, 2009).
- Panneau de fibre à densité moyenne de 25 mm d'épaisseur : 283 (Sonderegger, 2009).
- Panneau de fibre à densité moyenne mélaminé de 25 mm d'épaisseur : 44,7 (Sonderegger, 2009).

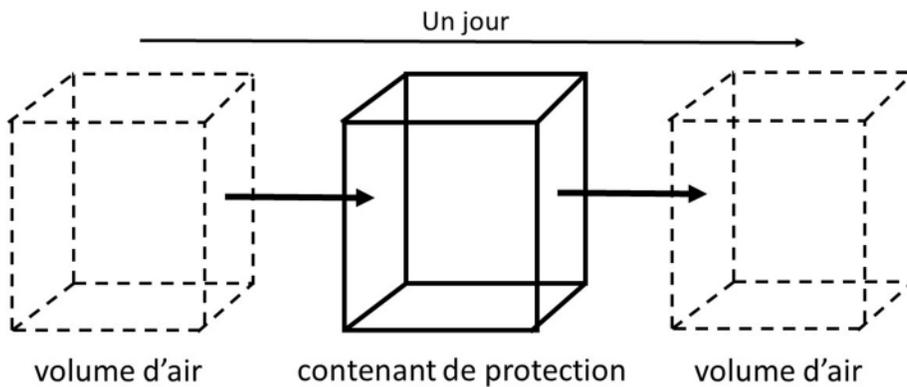
Il ressort clairement de la liste ci-dessus que les produits en bois non traités diffusent la vapeur d'eau beaucoup plus rapidement que les vitrages acryliques à une épaisseur donnée. Pour connaître les coefficients de diffusion en fonction de l'essence de bois, de la direction du grain, de la teneur en humidité et même de la section de l'arbre (par exemple, aubier par opposition au bois de cœur), consulter Choong (1968). Il convient de noter que l'ajout d'un revêtement peut également influencer le transfert global de la vapeur d'eau, et que ce dernier variera considérablement selon le produit (Yaseen, 1978).

En résumé, l'étanchéité d'un contenant de protection dépend souvent d'un scénario complexe mettant en jeu un mélange de mécanismes, et un essai d'étanchéité à l'air doit être effectué pour quantifier et analyser l'effet net. Pour en savoir plus sur ces processus de fuite, consulter Padfield (1966) et Michalski (1994).

Étanchéité à l'air

Dans le contexte du présent Bulletin, l'étanchéité à l'air est définie comme la résistance au transfert de gaz par les trous ou les interstices d'un contenant de protection ainsi qu'à la diffusion de gaz à travers l'enveloppe du contenant. Pour quantifier le tout, l'étanchéité à l'air ou le taux d'échange d'air est défini comme le nombre de fois où l'air est remplacé dans un contenant chaque heure ou chaque jour, et s'exprime à l'aide des unités 1/heure (hr^{-1}) et 1/jour (jour^{-1}), respectivement. On détermine généralement cette valeur en mesurant la

diminution de la concentration d'un gaz traceur dans un contenant de protection, et elle s'exprime en jours puisqu'une telle fuite est généralement assez lente. Une étanchéité à l'air de 1 par jour signifie que, chaque jour, un volume d'air extérieur égal au volume du contenant pénètre dans ce dernier et qu'un volume d'air équivalent en sort (figure 2).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0004

Figure 2. Schéma représentant un échange d'air par jour. Un volume d'air équivalent au volume du contenant de protection entre et sort de ce dernier chaque jour.

Une autre façon d'exprimer l'étanchéité à l'air est de parler d'un échange d'air tous les X jours. Par exemple, pour un contenant, on peut observer un échange d'air tous les 2 jours, ce qui équivaut à 0,5/jour. Le taux de fuite, les changements d'air par jour et le nombre de changements de volumes d'air par jour sont des synonymes d'étanchéité à l'air. Il peut y avoir de la confusion en raison de la terminologie variée. Une amélioration de l'étanchéité à l'air se traduit par une diminution du taux d'échange d'air et vice versa. De manière générale, on utilise l'expression « étanchéité à l'air » tout au long de ce texte. Cependant, lorsque l'on fait référence à la notion de taux croissant ou décroissant, on utilise plutôt l'expression « taux d'échange d'air ».

Gaz traceur

Un gaz traceur est un gaz servant à détecter les points de fuite ou à quantifier l'étanchéité à l'air des contenants de protection. Le gaz traceur employé doit être sans danger pour la santé humaine aux concentrations utilisées pour l'application. Idéalement, il ne doit pas interagir avec les objets dans le contenant de protection et les matériaux de ce dernier ni être adsorbé. Sa présence dans l'environnement immédiat doit être très faible par rapport à la concentration utilisée pour l'essai.

Les gaz traceurs utilisés dans un contexte muséal comprennent le CO_2 , l'oxyde nitreux (N_2O), le fluorocarbure, l'hexafluorure de soufre (SF_6), l'hélium (He) et l'hydrogène (H_2). Il faut consulter la fiche de données de sécurité de la cartouche de gaz employée, en particulier si des quantités plus importantes que ce qui est typiquement utilisé sont nécessaires. L'instrument de détection de gaz devrait être facilement accessible et simple à utiliser, en plus d'avoir une réponse de mesure rapide.

En ce qui concerne les changements climatiques, le CO₂ est un gaz à effet de serre et est généralement un sous-produit de l'extraction pétrolière. Le CO₂ a un potentiel de réchauffement global de 1 (valeur de référence), tandis que les effets du N₂O et du SF₆ sont bien plus importants, puisque ceux-ci ont un potentiel de 298 et de 22 800, respectivement (Solomon et coll., 2007). En pratique, l'utilisation du CO₂ dans le contexte de la mesure de l'étanchéité à l'air a peu d'effets sur les changements climatiques, puisqu'une personne moyenne libère environ 900 g de CO₂ tous les jours (LeMone, 2008) et qu'un contenant de protection de 1 m³ renfermant une concentration de 5 000 ppm ne contient que 9 g de CO₂.

On utilise parfois de la vapeur d'eau pour déterminer l'étanchéité à l'air d'un contenant. Bien que la vapeur d'eau puisse donner une estimation de l'étanchéité à l'air d'un contenant de protection, les résultats sont fortement influencés par la sorption d'humidité des matériaux hygroscopiques à l'intérieur du contenant (Daniel et Maekawa, 1992; Calver et coll., 2005).

Dans certains contenants de protection spéciaux, comme une vitrine offrant un milieu anoxique (c'est-à-dire sans oxygène), on utilise de l'oxygène ou de l'hélium comme gaz traceur (Smith et coll., 2016; Robinson, 2011). Le contenant de protection est rempli d'azote ou d'hélium, puis scellé. L'appareil de mesure indique si la concentration du gaz traceur augmente (entrée d'oxygène) ou diminue (sortie d'hélium).

Un essai de pression à l'air avec un manomètre peut également servir à déterminer l'étanchéité à l'air, mais il s'agit d'une méthode beaucoup moins courante. On utilise le manomètre pour surveiller la diminution de la pression initialement établie alors que l'air s'échappe du contenant de protection et retourne à la pression normale de la pièce. Il est important de faire un essai à la fois à une pression accrue et à une pression réduite, car les joints à compression n'agissent pas de la même façon dans les deux cas. Perino (2018) fournit des renseignements supplémentaires concernant cette technique.

Agents de détérioration

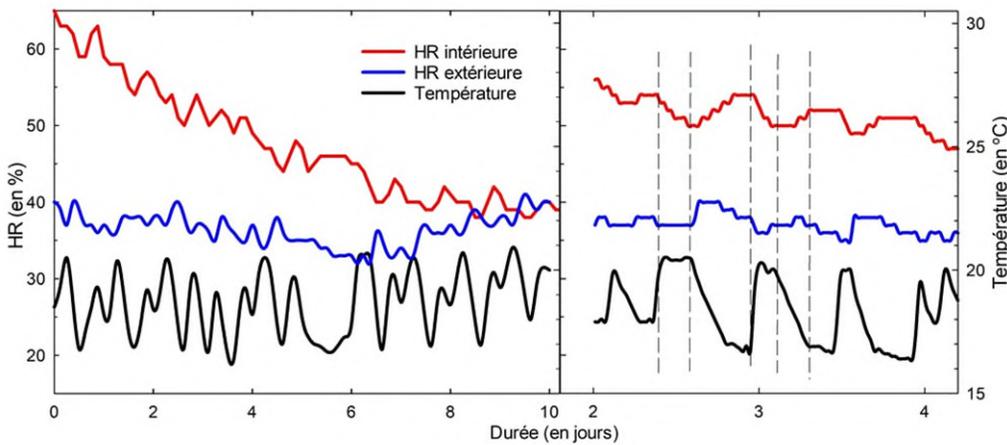
Les contenants de protection très étanches présentent de nombreux avantages. Ils peuvent prévenir ou, du moins, réduire les effets des différents agents de détérioration. Ils peuvent aussi permettre de créer un environnement adéquat à faible coût si l'environnement dans une pièce n'est pas suffisamment contrôlé. Cependant, dans certains contextes, des vitrines très étanches à l'air peuvent provoquer des effets indésirables. Dans cette section, on aborde les effets de l'étanchéité à l'air sur certains agents de détérioration.

Humidité relative

Parfois, il est plus pratique de contrôler passivement l'HR dans un ou plusieurs contenants de protection plutôt que dans l'ensemble d'une pièce. Le contrôle passif de l'HR se fait généralement à l'aide d'un sorbant d'humidité tel que le gel de silice. Un contenant de protection étanche à l'air permet d'optimiser le contrôle de l'HR avec un minimum d'effort, puisqu'il nécessite moins de sorbant et que ce dernier doit être remplacé moins fréquemment pour maintenir les niveaux d'HR souhaités. Le contrôle interne de l'HR sert à réduire au minimum les fluctuations de l'HR ou à maintenir, dans le contenant de protection, un taux d'HR en particulier qui est inférieur ou supérieur à celui de la pièce.

Par exemple, la figure 3 décrit une tendance de l'HR et de la température à l'intérieur et à l'extérieur d'une vitrine d'exposition ayant une étanchéité à l'air de 0,44/jour. À gauche, on voit la tendance pendant la période du 1^{er} au 11 mars 2021, sans sorbant d'humidité. Il faut environ neuf jours pour que l'HR à l'intérieur de la vitrine atteigne le même niveau que celui de la pièce. Il faudra moins de temps si la vitrine est moins étanche. À droite, on voit la tendance pour une plage de jours étroite : lorsque la température extérieure fluctue, l'HR de la pièce fluctue en sens inverse avec un certain retard, tout comme l'HR de la vitrine, qui fluctue toutefois avec un retard un peu plus long. Un cycle de fluctuation est apparent entre le quatrième et le cinquième jour. Pour la même période, les courbes des graphiques peuvent sembler différentes, puisque le taux d'échantillonnage est différent. Le taux est de toutes les 3 heures à gauche et de toutes les 30 minutes à droite.

Il existe également des systèmes de contrôle actif de l'HR pour les contenants de protection, et ceux-ci fonctionnent mieux avec des vitrines relativement bien étanches.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0006

Figure 3. Évolution de l'HR et de la température à l'intérieur et à l'extérieur d'une vitrine d'exposition ayant une étanchéité à l'air de 0,44/jour.

L'équation 1 montre la relation entre la quantité de sorbant d'humidité nécessaire pour contrôler l'HR dans le contenant de protection et l'étanchéité à l'air ainsi que plusieurs autres paramètres. L'équation a été vérifiée par Thickett et coll. (2007) et Thickett (2018). Des renseignements détaillés sur l'utilisation de cette équation figurent dans le Bulletin technique 33 *Gel de silice : contrôle passif de l'humidité relative*.

Équation 1 :

$$Q = C e q D V N t m i n M H F$$

Où

Q = quantité recommandée de sorbant sec (en kg)

C_{eq} = concentration de la vapeur d'eau au point d'équilibre (en g/m^3)

D = différence (en valeur décimale) entre l'HR à l'extérieur du contenant de protection et l'HR ciblée à l'intérieur (sans unité)

V = volume net d'air dans le contenant de protection (en m^3)

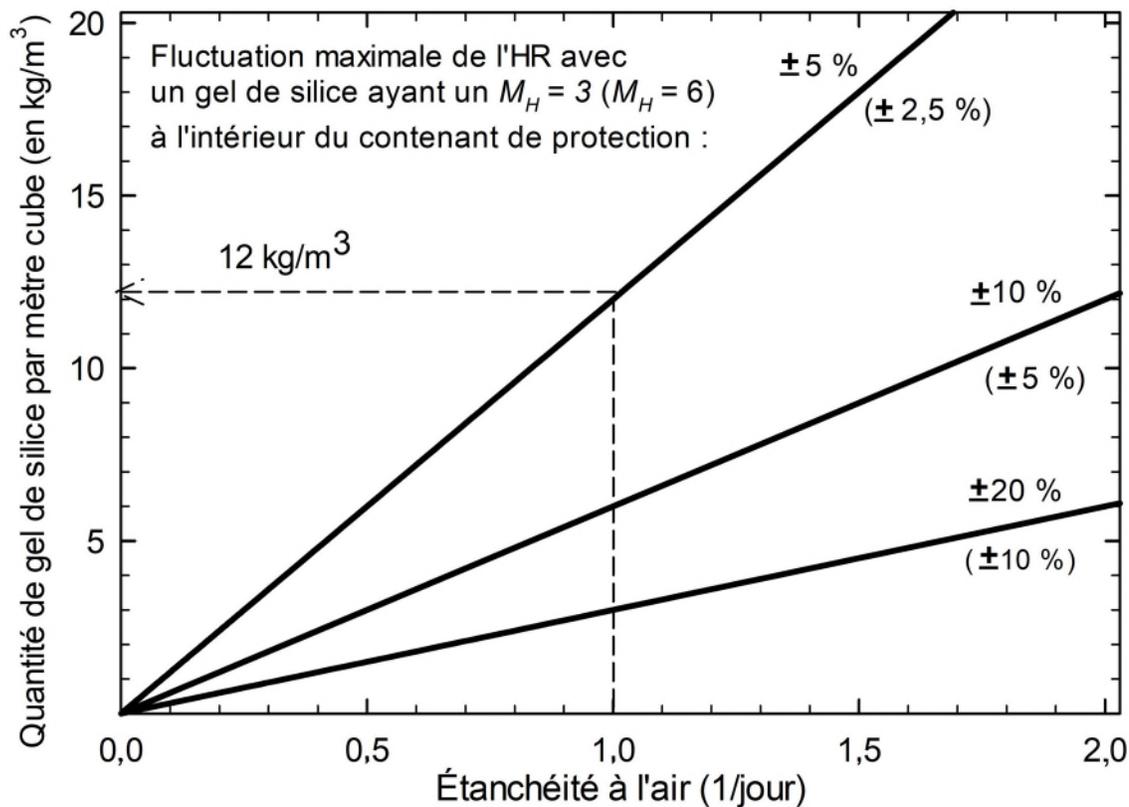
N = étanchéité à l'air (1/jour)

t_{min} = nombre minimal de jours pendant lesquels la plage d'HR ciblée doit être maintenue (en jours)

M_H = réservoir d'humidité donné du sorbant, y compris l'effet de l'hystérésis (g/kg pour une variation de l'HR de 1 %)

F = plage ciblée de variation de l'HR (en %)

La figure 4 montre un exemple de relation entre la quantité de sorbant d'humidité et l'étanchéité à l'air. Il est évident que les vitrines d'exposition très étanches à l'air nécessitent une quantité moindre de sorbant d'humidité pour maintenir la plage ciblée d'HR et que le sorbant doit être conditionné moins souvent.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0008

Figure 4. Quantité de gel de silice nécessaire pour maintenir des conditions stables d'HR au cours d'un cycle annuel selon l'équation 1. Les trois lignes diagonales représentent des plages acceptables de fluctuation de l'humidité dans la vitrine d'exposition.

Les tendances illustrées à la figure 4 ont été établies à partir des suppositions suivantes :

- le contenant de protection contient du gel de silice ordinaire (type A) ayant un $M_H = 3$ (les valeurs entre parenthèses sont fondées sur un gel de silice à haut rendement ayant un $M_H = 6$);
- l'HR à l'extérieur du contenant de protection est comprise entre 30 % et 70 %, avec une fluctuation maximale de $\pm 20\%$;
- l'HR à l'intérieur du contenant de protection est maintenue à 50 % dans une plage F.

Le graphique montre qu'avec une étanchéité à l'air de 1,0/jour, la quantité de sorbant nécessaire est de 12 kg/m³ si la fluctuation maximale de l'HR tolérée est de $\pm 5\%$. Si le taux d'échange d'air est réduit à 0,5/jour, seuls 6 kg/m³ sont nécessaires.

Dans certaines circonstances, il peut y avoir une HR élevée non souhaitée dans des contenants de protection étanches à l'air. Il peut s'agir d'un microenvironnement (par exemple, en raison d'un gradient de température) pouvant être favorable à la croissance de moisissures et aux réactions chimiques. Les quatre précautions suivantes permettront d'éviter ce scénario :

- Éviter les fluctuations de température de plus de 5 °C dans la pièce.
- Éviter que le contenant de protection soit en contact avec un mur froid.
- Éviter de stocker des objets humides dans le contenant de protection.
- Éviter de placer des objets dans le contenant de protection lors de périodes où l'HR est élevée ($\geq 75\%$).

Des exemples d'utilisation de l'étanchéité à l'air pour optimiser le rendement des gels de silice sont présentés sous [Étude de cas 1 : spécifier une étanchéité à l'air en fonction de l'entretien du gel de silice](#).

Polluants

L'étanchéité à l'air des contenants de protection peut être un avantage ou un inconvénient pour le contrôle des polluants gazeux et particulaires, en fonction, principalement, de l'endroit où se trouve la source. Les polluants extérieurs et les polluants générés dans le bâtiment par les matériaux ou les activités humaines peuvent s'infiltrer dans les contenants de protection. Les contenants de protection étanches à l'air peuvent bloquer ou, à tout le moins, réduire de telles infiltrations.

L'équation 2 montre comment l'étanchéité à l'air influence le rapport entre les concentrations d'un gaz à l'intérieur et à l'extérieur (Weschler et coll., 1989). Cette relation est également illustrée graphiquement à la figure 5. Il convient de noter que l'équation exclut la génération de polluants à l'intérieur du contenant de protection.

Équation 2 :

$$C_{in} - C_{ex} = \frac{K S}{V} + N$$

Où

C_{in} = concentration à l'intérieur (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

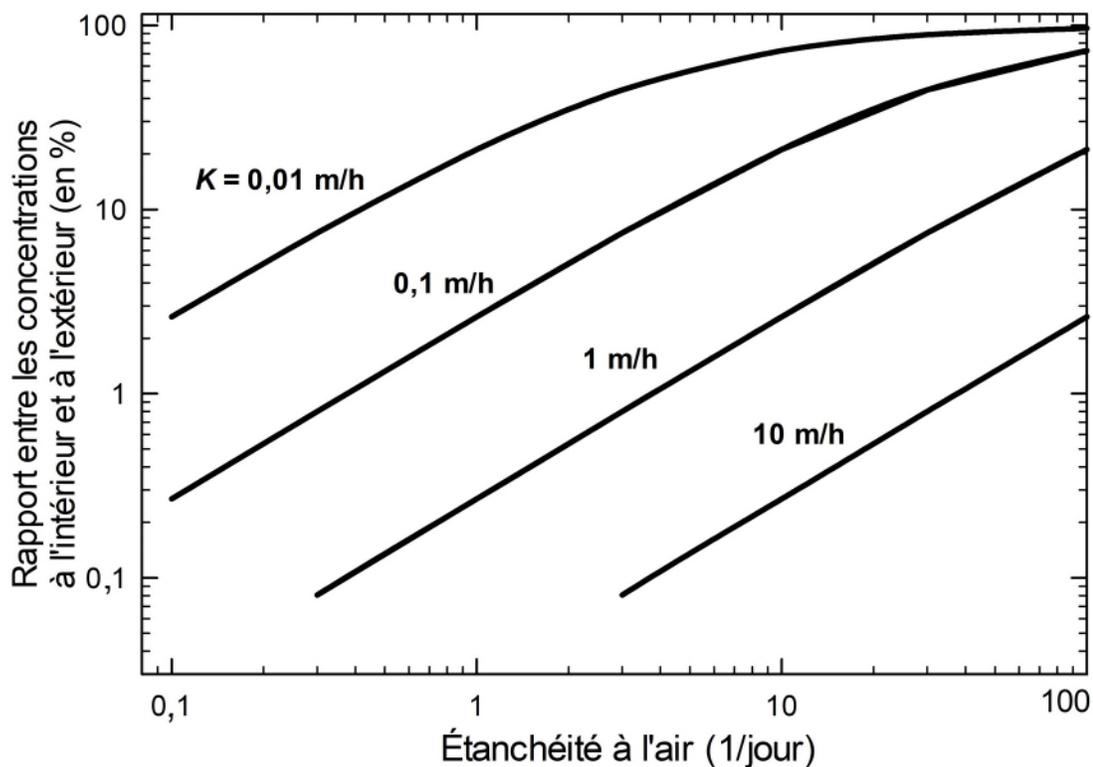
C_{ex} = concentration à l'extérieur (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

K = coefficient de transfert de masse (absorption) [en m/h]

N = étanchéité à l'air (1/jour)

S = surface du matériau (en m^2)

V = volume net d'air dans le contenant de protection (en m^3)



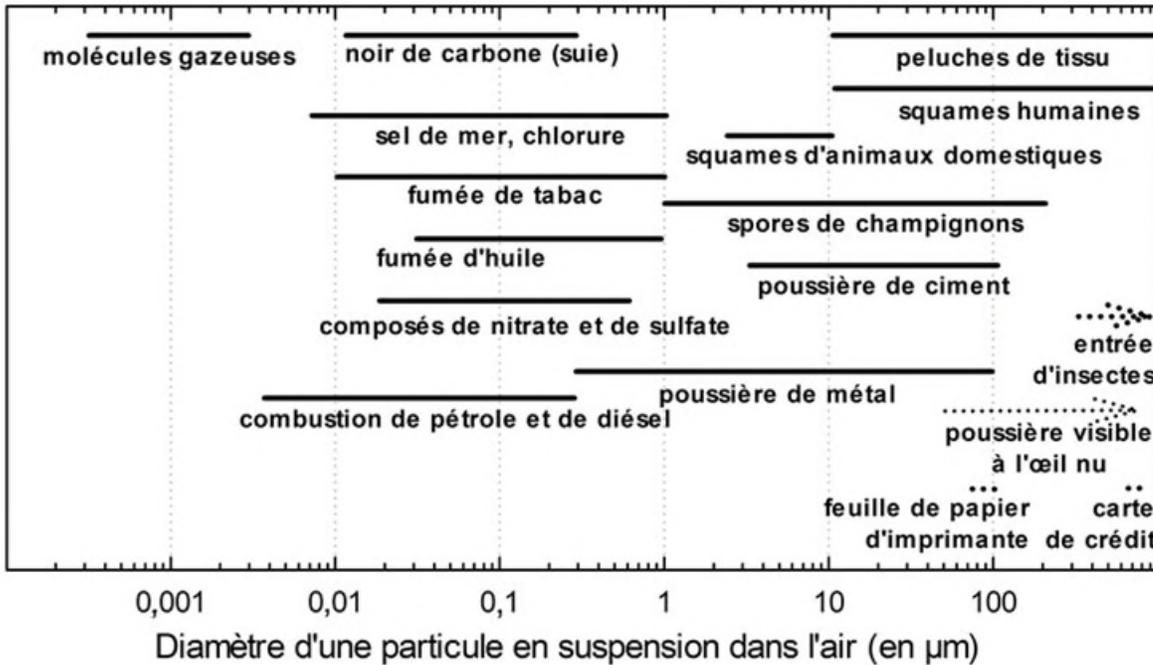
© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0010

Figure 5. Rapport entre la concentration à l'intérieur et celle à l'extérieur d'un composé volatil en fonction de l'étanchéité du contenant de protection et de différents coefficients de transfert de masse (K).

Lorsque le taux d'échange d'air diminue (l'étanchéité à l'air s'améliore), le rapport entre la concentration à l'intérieur et la concentration à l'extérieur diminue. Les infiltrations sont alors moins importantes, ce qui entraîne une concentration à l'intérieur plus faible. L'absorptivité des matériaux dans le contenant de protection, également appelée « coefficient de transfert de masse » ou « vitesse de dépôt », a une incidence sur la concentration à l'intérieur. Plus l'absorptivité est élevée, plus la concentration à l'intérieur est faible. Les vitesses de dépôt pour différents systèmes polluant-matériau sont compilées dans Tétreault (2003, p. 140).

Le dépôt de poussière dans un contenant de protection dépend également de l'étanchéité à l'air. La poussière peut être formée de divers composés allant de minuscules particules de matériaux brûlés à de lourdes peluches de tissu ou à des squames humaines, comme le montre la figure 6. D'après les données expérimentales de Thickett (2018), le rapport de dépôt de poussière à l'intérieur et à l'extérieur en pourcentage (%) est directement proportionnel à l'étanchéité à l'air : le taux d'échange d'air (1/jour) multiplié par un facteur de 24. Cette relation est valable pour des poussières ayant un diamètre aérodynamique de $20\ \mu\text{m}$ à $200\ \mu\text{m}$ dans la plage d'étanchéité à l'air de 0 à 2 par jour avec un écart type de 20 %. Un contenant de protection ayant un taux d'échange d'air de 1/jour présente un rapport de dépôt de poussières grossières à l'intérieur et à l'extérieur de 24 %, ce qui signifie que la vitesse de dépôt à l'intérieur du contenant de protection est environ quatre fois plus lente qu'à l'extérieur. Ce facteur représente la réduction de particules de poussière principalement de grande taille, comme celles que

gènèrent les humains à partir de leurs vêtements, les squames d'animaux domestiques, certaines spores de champignons et la poussière de ciment. L'infiltration de poussières d'un diamètre bien inférieur à 20 µm devrait se comporter davantage comme un gaz. Les particules supérieures à 200 µm ont un temps de suspension dans l'air court et ne peuvent s'infiltrer dans un contenant de protection que si elles sont générées à proximité immédiate, par exemple dans des galeries très achalandées.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0012

Figure 6. Distribution de la poussière. L'épaisseur d'une carte de crédit et d'une feuille standard de papier d'imprimante est indiquée à titre de référence.

Auparavant, on mettait l'accent sur la prévention de l'infiltration de polluants provenant de l'extérieur ou de l'intérieur du bâtiment dans les contenants de protection. Lorsque les contenants de protection, comme les vitrines d'exposition, sont devenus plus étanches à l'air, de nouveaux problèmes sont apparus en raison de la génération de polluants à l'intérieur des contenants mêmes. Cela se produit lorsque les concentrations de polluants augmentent en raison d'un taux d'émission plus rapide que leur exfiltration.

L'équation 3 montre comment l'étanchéité à l'air influence le rapport entre la concentration à l'intérieur et la concentration de saturation (Meyer et Hermanns, 1985). La figure 7 illustre cette relation.

Équation 3 :

$$C_i / C_{sat} = K_s \frac{V_N}{V} + K_s \frac{V}{V}$$

Où

C_{in} = concentration à l'intérieur (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

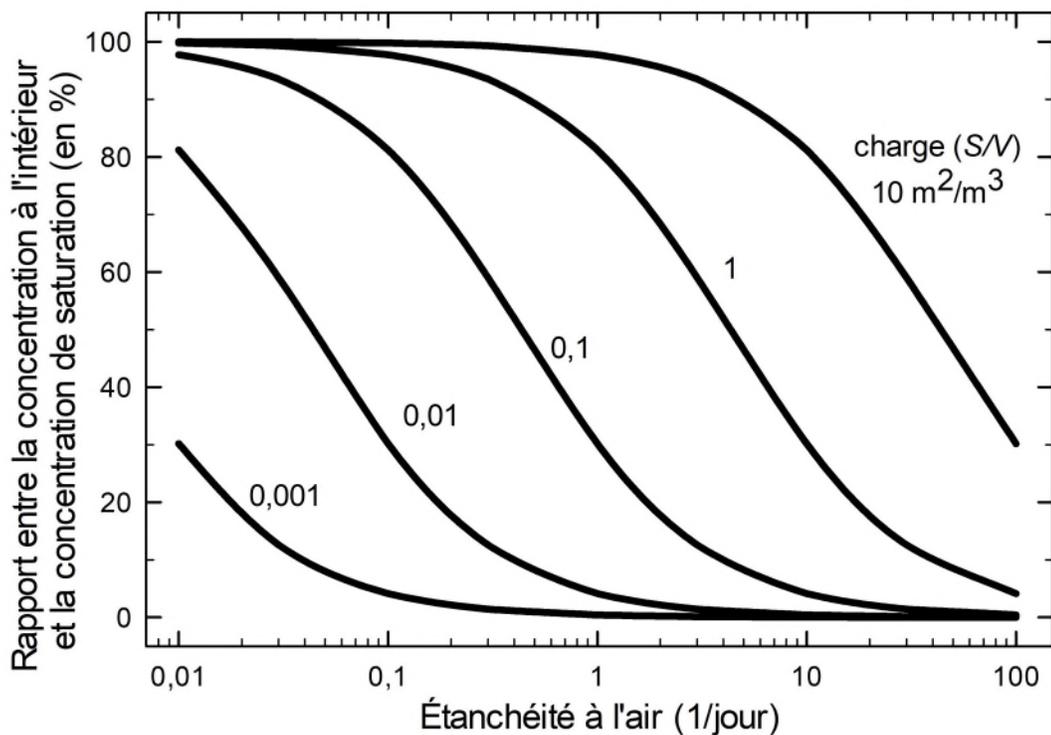
C_{sat} = concentration à l'intérieur saturée (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

K = coefficient de transfert de masse (émission) [en m/h]

N = étanchéité à l'air (1/jour)

S = surface du matériau (en m^2)

V = volume net d'air dans le contenant de protection (en m^3)



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0014

Figure 7. Rapport entre la concentration à l'intérieur et la concentration de saturation d'un composé volatil émis par un produit à l'intérieur d'un contenant de protection en fonction de l'étanchéité à l'air et de différentes charges.

Le scénario utilisé pour le graphique est fondé sur un composé volatil émis par un produit dans un contenant de protection. Le coefficient de transfert de masse utilisé est de 0,18 m/h, et il a été calculé à partir de l'émission d'acide acétique par le chêne. La concentration de saturation est la concentration maximale qu'un composé

volatil peut atteindre dans un contenant de protection absolument étanche à l'air sans aucun matériau de sorption. Lorsque le taux d'échange d'air diminue, le rapport de concentration augmente et, par conséquent, la concentration à l'intérieur augmente également.

La concentration à l'intérieur est aussi influencée par la charge de la source. La charge est le rapport entre la surface émissive et le volume net du contenant de protection. Pour une étanchéité à l'air fixe, un coefficient de transfert de masse élevé (ou un matériau très émissif) pousse la concentration à l'intérieur vers la concentration de saturation. Un exemple de l'utilisation de l'équation 3 se trouve dans [Étude de cas 2 : risque de corrosion du plomb dans une vitrine d'exposition en chêne](#).

Les concentrations élevées de divers gaz émis par les matériaux des contenants de protection ou des objets mêmes peuvent constituer une menace pour les objets (y compris ceux qui émettent des gaz). Cependant, de nombreux gaz sont inoffensifs et certains d'entre eux peuvent même offrir une légère protection aux objets. Des recherches liées à la conservation du poly(chlorure de vinyle) souple montrent comment un flux d'air autour des objets fabriqués dans ce matériau peut avoir une incidence sur le plastifiant à la surface (King et coll., 2020). D'autres études sont nécessaires pour comprendre les effets de divers gaz sur les matériaux dans les contenants de protection. Dans le cas des matériaux qui émettent une grande quantité de gaz, il est souvent préférable de retirer les matériaux problématiques ou les objets sensibles du contenant de protection. Sinon, il faut modifier le contenant de protection de manière à accroître l'exfiltration naturelle ou à le ventiler activement. Il est préférable de choisir des matériaux qui sont généralement acceptés en conservation ou qui ont été testés pour confirmer leur faible réactivité (Tétreault, 2017).

Dans les utilisations qui concernent strictement les polluants, pour atteindre le niveau optimal d'étanchéité à l'air, il faut prendre en compte les effets des polluants infiltrés ainsi que ceux générés à l'intérieur du contenant de protection. L'équation 3, combinée à la connaissance de l'étanchéité à l'air d'un contenant de protection, permet de prédire le niveau de polluants dans ce contenant. Il est possible de trouver des renseignements à propos du risque que posent ces niveaux de polluants à l'égard de différents objets dans Tétreault (2003, p. 110 à 134) et Tétreault (2021).

Dans certaines situations, l'oxygène est un agent indésirable et est classé comme un polluant en raison de sa capacité à provoquer des dommages chimiques. En de rares occasions, on préconise l'utilisation d'un contenant de protection très étanche à l'air (par exemple, pour la conservation d'objets très importants ou très sensibles à l'oxygène, comme le caoutchouc naturel). Un microenvironnement anoxique empêche l'oxydation des objets. En général, l'oxygène est évacué à l'aide d'un gaz inerte, comme l'azote, et un absorbant d'oxygène est placé dans le contenant de protection (Daniel et Lambert, 1993). Le rendement et la durée de vie de l'environnement à faible teneur en oxygène dépendent de l'étanchéité à l'air et de la quantité d'absorbant utilisée (même si le terme « absorbant » est couramment utilisé ici, l'oxygène est éliminé au moyen de réactions chimiques). De manière générale, les contenants de protection anoxiques offrent une grande protection; cependant, certains matériaux peuvent se détériorer plus rapidement ou différemment dans des microenvironnements anoxiques. Beltran et coll. (2012) ont quantifié certaines exceptions en ce qui concerne l'exposition à la lumière dans des conditions où la teneur en oxygène est faible.

Incendie

Un contenant de protection étanche à l'air combustible peut offrir une protection limitée contre un incendie direct; cependant, il peut prévenir des dommages importants lors d'un petit incendie en ralentissant l'infiltration de la fumée (consulter [Polluants](#)). Les transferts de chaleur à travers les contenants de protection vitrés peuvent poser problème (consulter [Lumière et température](#)). Les contenants de protection étanches à l'air réduisent également les effets de l'eau en cas d'intervention visant à éteindre un incendie.

Lumière et température

La lumière directe du soleil ou les sources de lumière artificielle très brillantes à proximité peuvent entraîner une forte hausse de la température, ce qui est indésirable dans une vitrine d'exposition en raison de l'effet de serre. De nombreux types de matériaux et d'objets dans les vitrines d'exposition peuvent absorber le rayonnement des sources lumineuses, en particulier ceux qui ont des surfaces sombres. Ils peuvent faire monter la température à l'intérieur des vitrines en réémettant des radiations à longueur d'onde inférieure (notamment infrarouges) et par conduction également. Cela peut être un problème si le niveau de lumière est élevé. Les vitrines d'exposition qui ne sont pas étanches peuvent permettre à une partie de l'air chaud de se dissiper.

Les fluctuations de température ont également une incidence sur l'étanchéité à l'air (Holmberg et Kippes, 2003; Thickett et coll., 2005; Watts et coll., 2007), car elles provoquent un écart de pression (ou de densité de l'air) et ont des répercussions sur la capacité de sorption des matériaux dans le contenant de protection, ce qui entraîne des perturbations du taux d'échange d'air. Pour en savoir plus, consulter [Étude de cas 3 : l'effet de la température sur la teneur en CO₂ à l'équilibre](#).

Insectes

Un contenant de protection étanche à l'air empêche l'infiltration d'insectes. Il a été constaté que les insectes ne peuvent pénétrer dans les interstices de moins de 330 µm (Strang, 2012, p. 145). Si des insectes se trouvent déjà à l'intérieur d'un contenant de protection bien étanche, ils peuvent endommager les objets qui s'y trouvent, mais leur confinement protégera les autres objets de la collection. On peut également utiliser une vitrine très étanche à l'air et à faible teneur en oxygène pour éradiquer tout insecte se trouvant dans les objets (Maekawa et Kerstin, 2003).

Eau

Un contenant de protection bien étanche peut aussi empêcher l'infiltration d'eau par le bas en cas d'inondation, par le haut en cas de dégât d'eau et par le côté en cas d'éclatement d'un tuyau ou de déversement de liquide par des vandales ou des invités lors d'événements spéciaux. On recommande de s'assurer que les contenants de protection sont à au moins 10 cm du sol. On évitera ainsi l'infiltration d'eau lors de la plupart des petites inondations. Certains musées peuvent être intéressés par des contenants offrant une protection contre l'égouttement de l'eau, par exemple les contenants qui réussissent un essai d'égouttement de l'eau de 30 minutes (Underwriters Laboratories, 2015).

Vandalisme et vol

L'absence d'interstices évidents dans les vitrines d'exposition peut atténuer le risque de vandalisme ou de vol.

Détection des points de fuite

Un simple examen visuel peut permettre de détecter les principaux points de fuite qu'il faut colmater pour améliorer le rendement d'une vitrine d'exposition. Durant ce processus, on peut utiliser un morceau de papier ou une carte de crédit (ou l'équivalent) pour repérer les interstices relativement simples à réparer. Le niveau d'investigation suivant consiste à localiser les points de fuite à l'aide d'instruments (généralement un détecteur de fuites à gaz réfrigérant ou à ultrasons). Il peut être avantageux d'utiliser les deux techniques de mesure, car un détecteur peut trouver des points de fuite qui ne peuvent être repérés par l'autre méthode. Les différentes méthodes de détection des fuites sont décrites ci-dessous.

Examen visuel des interstices

Lorsqu'on ne dispose pas d'instruments coûteux, il est souvent facile de localiser visuellement les points de fuite présumés. Pour ce faire, il faut commencer par examiner de près l'intérieur et l'extérieur de chaque surface et interface en tenant compte des zones où les fuites se produisent le plus couramment, à savoir les suivantes :

- les interfaces entre les surfaces assemblées, tels les panneaux en vitre, les portes et les éléments structurels;
- les zones autour des points d'accès tels que la porte du compartiment du sorbant;
- les zones où il y a des produits et des joints d'étanchéité mal ajustés, mal appliqués ou dégradés, ou encore les endroits où de tels produits ou joints sont manquants;
- les trous de serrure;
- les trous de passage de fils électriques, de composants d'éclairage ou d'autres accessoires;
- les zones où il y a des fixations lâches ou déformées, ou encore les endroits où des fixations sont manquantes.

Il faut accorder une attention particulière aux surfaces destinées à être ouvertes ou démontées et aux zones autour des accessoires (connexions de lumières, serrures, etc.). Les irrégularités de surface et les déformations dues aux renforts mécaniques peuvent entraîner la formation d'interstices au fil du temps. Cela se produit souvent avec les vitrines de conception modernes dotées de grands panneaux vitrés, car ceux-ci se plient vers l'extérieur au milieu en raison des forces de serrage aux extrémités. D'autres facteurs peuvent être à l'origine d'un mauvais ajustement des joints d'étanchéité : matériaux inadaptés (épaisseur, conformité et type de profil), défauts d'assemblage, déformations de la vitrine, mauvaise jonction aux angles, dégradation chimique (vieillesse), déformation rémanente après compression ou une combinaison de ces problèmes.

Les signes révélant la présence d'insectes dans un contenant de protection peuvent indiquer qu'il existe au moins un point de fuite suffisamment grand pour leur permettre d'y pénétrer. La découverte d'insectes vivants ou morts laisse supposer qu'il existe une fissure ou un interstice de 330 µm ou plus (Strang 2012, p. 145). Cela dit, il faut garder à l'esprit qu'il se peut que les insectes proviennent des objets placés dans la vitrine d'exposition.

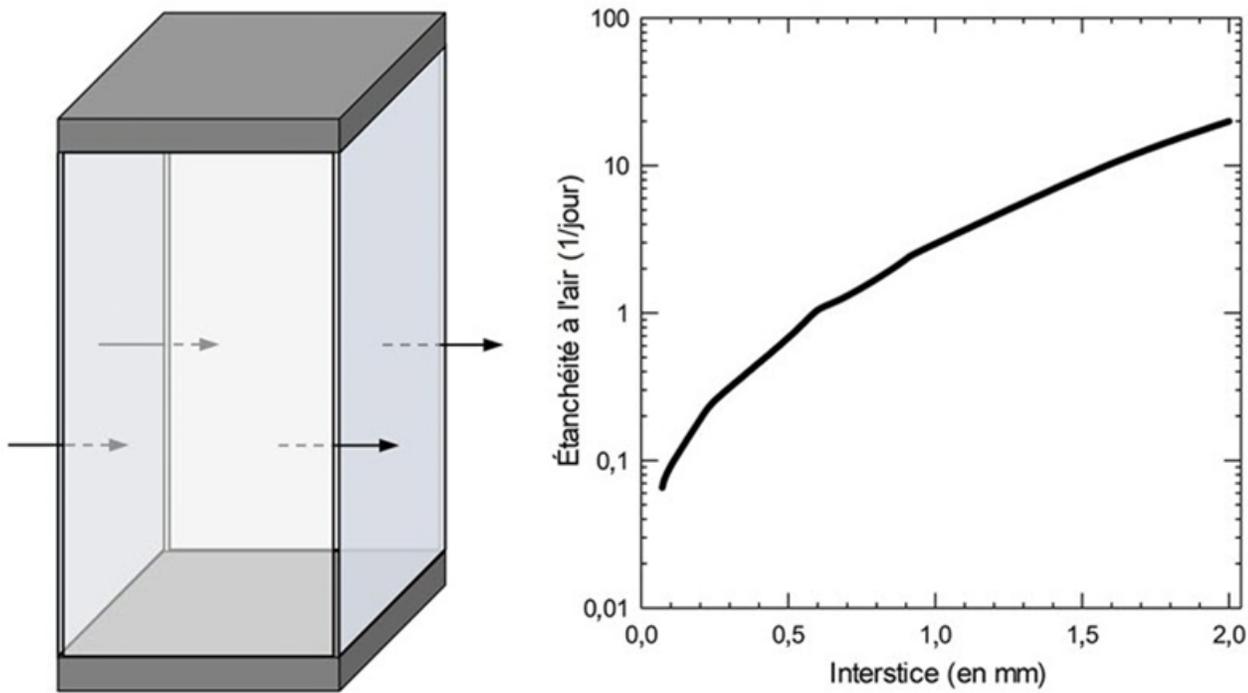
Essais à l'aide de morceaux de papier

Une jauge d'épaisseur est utile pour mesurer l'épaisseur d'un interstice particulier; cela dit, une simple feuille de papier constitue une référence utile pour déterminer l'épaisseur d'un interstice, car, bien souvent, il se peut que l'on n'ait pas de jauge sous la main. Lors de l'examen visuel, essayer d'insérer des morceaux de papier dans différentes interfaces du contenant de protection, par exemple entre deux panneaux de verre. Une feuille de papier d'imprimante standard (70 μm à 100 μm d'épaisseur) permet de détecter les interstices de 100 μm ou plus. Si une feuille de papier ne passe pas, les insectes ne peuvent pas pénétrer, car l'interstice est alors inférieur au seuil d'entrée de 330 μm . À titre de comparaison, une carte de crédit a une épaisseur de 760 μm (ISO/IEC 7810:2019). Un interstice de cette taille indiquerait que des insectes peuvent s'infiltrer (consulter la figure 6 pour connaître le diamètre typique de certains articles). Pour vérifier si des insectes peuvent pénétrer, on peut aussi utiliser trois ou quatre feuilles de papier d'imprimante superposées ou mesurer au préalable avec un pied à coulisse divers matériaux, tel du papier cartonné, pour ensuite les employer afin de vérifier la taille des interstices.

Il est possible de prédire l'étanchéité à l'air en fonction de l'épaisseur d'un interstice en employant un modèle simple de fuite des contenants de protection fondé sur Michalski (2017). La figure 8 montre l'effet de la largeur d'un interstice entre quatre panneaux de verre d'une vitrine d'exposition sur l'étanchéité à l'air correspondante. Plusieurs paramètres sont utilisés dans le modèle :

- un volume intérieur de 1,28 m³ (80 cm sur 80 cm sur 200 cm);
- des interstices uniformes le long des panneaux de verre;
- aucun autre point de fuite dans la vitrine (difficile à réaliser en pratique);
- une fluctuation quotidienne de la température de ± 2 °C.

Dans cet exemple, tous les interstices doivent être inférieurs à 600 μm pour obtenir une étanchéité à l'air inférieure à 1/jour. S'il n'est pas possible d'insérer une feuille de papier de 100 μm dans les interstices, l'étanchéité à l'air pourrait être inférieure à 0,1/jour.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0016

Figure 8. Vitrine d'exposition composée de quatre grands panneaux de verre (à gauche) et effet de la largeur de l'interstice entre les panneaux sur l'étanchéité à l'air (à droite).

Détection électronique des fuites

Les principaux points de fuite ne sont pas toujours faciles à repérer en combinant un examen visuel et un essai à l'aide de morceaux de papier, en particulier lorsqu'on vise des niveaux d'étanchéité à l'air plus élevés. Le niveau d'investigation suivant fait appel à des techniques de détection électronique des fuites, qui utilisent une source chimique ou physique dans le contenant de protection et un capteur externe pour localiser sa sortie. L'utilisateur doit balayer toutes les surfaces avec le détecteur pour trouver à quels endroits s'échappe le gaz traceur ou le signal ultrasonore. L'efficacité de la détection dépend de l'intensité de la fuite et de la sensibilité de l'instrument. Un détecteur de fuites peut ne pas localiser tous les points de fuite lorsque certaines zones du contenant de protection sont difficiles d'accès, notamment dans le cas de parois encastrées.

Méthode de détection des fuites par gaz traceur

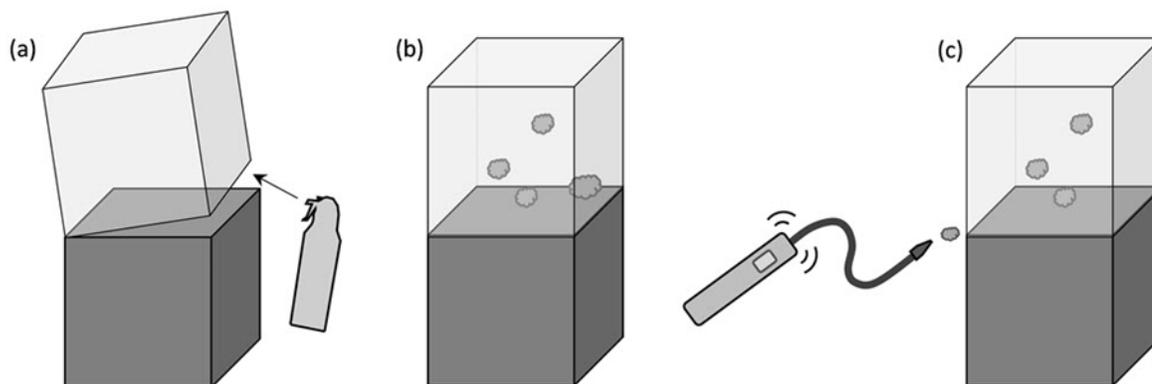
Utiliser un gaz traceur et un détecteur correspondant est une méthode rapide pour détecter les fuites importantes, notamment dans les interstices ouverts. Elle n'est pas appropriée pour détecter les fuites lentes à travers de très petits trous ou la diffusion de gaz à travers les matériaux.

Les gaz traceurs chimiques sont généralement des composés perfluorés utilisés comme réfrigérants ou comme agents propulseurs dans les dépoussiéreurs d'air pour l'électronique. Les détecteurs de fuites à gaz réfrigérants commerciaux détectent ces types de gaz, et l'on trouve souvent ces appareils dans les coffres à outils des responsables du fonctionnement des immeubles. Une autre option consiste à utiliser une source de 5 % d'H₂, car les concentrations inférieures à 5,7 % d'H₂ sont ininflammables. Pour en savoir plus, consulter [Gaz traceur](#).

La figure 9 montre les principales étapes à suivre pour procéder à ce type de détection de fuites :

1. Injecter un gaz traceur dans la vitrine.
2. Attendre pendant quelques minutes qu'il se disperse.
3. Balayer les zones de fuite potentielles à l'aide d'un détecteur.

Bien souvent, il est difficile de contrôler adéquatement l'injection de gaz traceur, c'est pourquoi il faut faire des essais pour déterminer la quantité appropriée à utiliser pour une taille de vitrine d'exposition donnée. Il peut être nécessaire d'injecter du gaz traceur à plusieurs reprises en raison des pertes qui se produisent pendant que le gaz atteint les points de fuite. Le fait de retirer le plateau de présentation, si cela est possible, peut accélérer la diffusion du gaz à l'intérieur du contenant de protection. Il convient également de noter qu'une partie du gaz peut rester au point d'injection. Il est donc utile, dans un tel cas, de commencer le balayage dans une autre zone de la vitrine d'exposition.



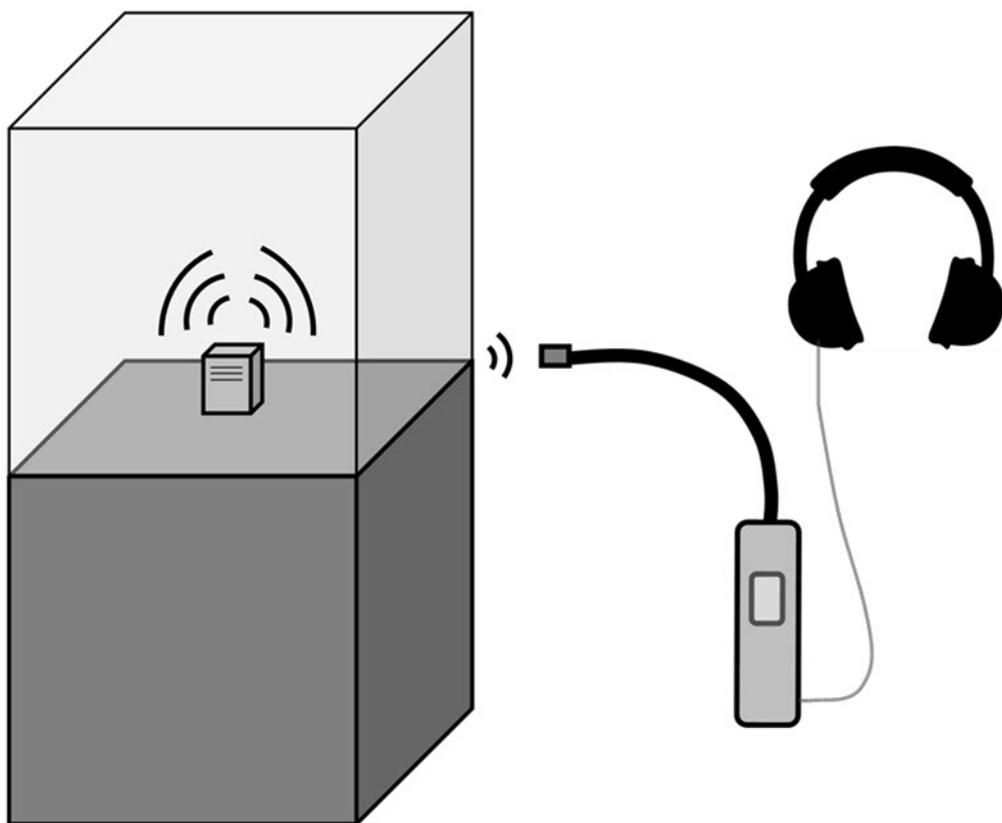
© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0017

Figure 9. Détection des points de fuite à l'aide d'un gaz traceur.

Méthode de détection des fuites par ultrasons

La localisation de fuites à l'aide d'un émetteur d'ultrasons et d'un détecteur est similaire dans son principe à la méthode de détection des fuites par gaz traceur. La détection des fuites par ultrasons est employée dans de nombreux domaines, et son application la plus similaire aux vitrines d'exposition est la localisation de fuites dans les enveloppes de bâtiments. Lors de la recherche d'un instrument, il faut prendre soin de bien faire la distinction entre un dispositif émetteur-récepteur et un détecteur à ultrasons au sens strict (pour les fuites de gaz comprimés).

Dans le cas de notre application, on place, à l'intérieur de la vitrine d'exposition, un émetteur d'ultrasons dont la fréquence est centrée à environ 40 kHz. Ensuite, l'utilisateur balaye les zones extérieures de la vitrine avec une sonde de détection sensible à la fréquence de l'émetteur. Un signal sonore indique toute détection de fuite. La figure 10 présente le schéma simplifié de cette configuration. De manière générale, il s'agit d'un essai qualitatif pour la détection des fuites; toutefois, l'intensité du signal permet d'avoir une idée générale de l'ampleur de la fuite.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0018

Figure 10. Détection des points de fuite à l'aide d'une technique employant des ultrasons.

Détermination de l'étanchéité à l'air par la méthode de détection des fuites par gaz traceur

La détermination de l'étanchéité à l'air d'un contenant de protection est généralement effectuée à l'aide d'un gaz traceur. Pour effectuer ce genre d'essai, il faut avoir une source de gaz traceur, un injecteur de gaz traceur et un enregistreur de données de surveillance du gaz traceur. Cette section couvre chacun de ces trois aspects.

Le dioxyde de carbone comme gaz traceur

Le CO₂ est couramment utilisé comme gaz traceur, et il est facile de se le procurer pour déterminer le taux de fuite d'un contenant de protection. Les niveaux de fond de CO₂ à l'intérieur se situent généralement entre 400 ppm et 1 000 ppm, en fonction du degré d'activité humaine à proximité (les humains génèrent du CO₂ en respirant).

Au Canada, de nombreuses autorités sanitaires se fient à l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists pour fixer leurs propres limites d'exposition au CO₂. La limite pour une période de 8 heures est de 5 000 ppm, et le seuil maximal acceptable est de 30 000 ppm (habituellement pendant 15 minutes) [Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2021]. En 2021, Santé Canada a proposé une limite de concentration du CO₂ de 1 000 ppm pour une exposition quotidienne dans ses [lignes directrices sur la qualité de l'air intérieur résidentiel](#). Les cartouches de CO₂ comprimé de petite taille dont on se sert pour déterminer l'étanchéité d'un contenant de protection devraient produire une quantité de CO₂ bien en deçà de ces seuils de concentration sécuritaires.

En ce qui concerne le risque d'endommagement des objets, il semble demeurer faible lorsqu'on utilise du CO₂. Le CO₂ peut se transformer en acide carbonique dans l'eau (H₂CO₃). L'injection de CO₂ dans de l'eau fait en sorte que le pH de cette dernière oscille autour de 3 ou 4. Cette transformation est facilement réversible puisque, pour ce faire, il suffit d'ouvrir le contenant comprenant l'eau chargée de gaz carbonique. Heureusement, la vapeur d'eau présente dans l'air ne favorise pas la formation d'acide. Kigawa et coll. (2011) ont observé de légères modifications chimiques sur des protéines animales après que celles-ci eurent été exposées à une concentration de CO₂ de 600 000 ppm pendant deux semaines. Thickett (2012, p. 107 à 109) a mentionné la préoccupation selon laquelle la corrosion du plomb pourrait transformer le carbonate de plomb basique en carbonate de plomb en présence de CO₂. Pour étudier cette théorie, de la poudre de carbonate de plomb basique a été contrôlée après une exposition à une concentration de CO₂ de 20 000 ppm pendant 7 jours, et très peu de changements ont été observés. Par précaution, il est recommandé de procéder à une injection de CO₂ lorsque l'HR ambiante est inférieure à 75 %.

Bien que l'on ne s'attende pas à observer des dommages chimiques lors d'essais d'étanchéité, les matériaux constitutifs des contenants de protection et les objets eux-mêmes ont des capacités variables d'absorption du CO₂, ce qui peut avoir une incidence sur la détermination de l'étanchéité à l'air. L'effet du gel de silice, du charbon actif, du bois et des livres est étudié dans [Étude de cas 3 : l'effet de la température sur la teneur en CO₂ à l'équilibre. Le charbon actif, en particulier, entraîne une importante déviation de la concentration de CO₂](#).

Injecteur de gaz traceur

On trouve couramment sur le marché des dispositifs d'injection de CO₂ destinés à des utilisations telles que le brassage artisanal et le gonflage des pneus de vélo (figure 11). Dans ces cas, on utilise souvent des cartouches de 12 g ou de 16 g (les grands utilisateurs de CO₂ peuvent employer des bouteilles de 2,3 kg). Les petites cartouches contiennent du CO₂ dans un équilibre liquide-gaz avec une pression d'environ 5 700 kPa (825 lb/po²) à température ambiante. Pour cette raison, les bouteilles ne peuvent être transportées que par voie

terrestre. Les ensembles d'injecteurs contiennent souvent une cartouche de CO₂. À noter qu'il est important de savoir, pour les achats futurs, si la cartouche fournie est filetée ou non.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0019

Figure 11. Deux injecteurs de CO₂ compatibles avec des cartouches filetées. Le premier modèle d'injecteur (gris) est conçu pour les vélos et est doté d'un tube d'extension en laiton adapté, alors que le second injecteur est muni d'un minirégulateur.

Le CO₂ pur est inodore, mais s'il est issu de la combustion ou d'un réservoir de combustible fossile, il est loin d'être propre. Certaines cartouches de CO₂ ne sont tout simplement pas conçues pour le marché alimentaire ou pour être utilisée dans une pièce non ventilée. Dans ces cartouches, il se peut que l'on trouve des traces importantes d'hydrocarbures et des résidus huileux en raison d'une filtration minimale lors de leur fabrication.

On peut classer les cartouches de CO₂ en fonction de leur pureté dans trois groupes : qualité alimentaire, filtrée et non spécifiée. À la figure 12, le contenu de deux cartouches de pureté non spécifiée a été libéré sur un morceau de papier, ce qui a laissé une tache et généré une odeur désagréable à proximité. Les cartouches filtrées peuvent laisser quelques résidus sur le papier (environ 2/3 de moins que pour la variété dont la pureté n'est pas précisée) et ne générer qu'une faible odeur désagréable, voire aucune odeur de cette nature. Les cartouches de qualité alimentaire ne dégagent pas d'odeur et ne laissent pas de taches. Par précaution, il vaut mieux éviter d'utiliser des cartouches de CO₂ de pureté non spécifiée pour tester l'étanchéité de contenants de protection comprenant des objets.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0020

Figure 12. Une tache sombre s'est formée sur un papier de coton après que l'on eut déchargé 2 cartouches de CO₂ de 16 g directement sur sa surface. Une odeur d'hydrocarbures était clairement perceptible lors de la libération du CO₂.

Surveillance des gaz traceurs et enregistreurs de données

Les technologies de surveillance ont grandement évolué au cours des 20 dernières années. De nos jours, les enregistreurs de données de surveillance du CO₂ sont abordables et à la portée de nombreux musées et établissements d'archives. Par ailleurs, il est également très facile de trouver des appareils sans fil. L'utilisation d'un appareil sans fil est facultative, car un tel appareil peut provoquer des interférences avec les autres instruments sans fil à proximité.

La plupart des appareils de mesure du CO₂ commerciaux utilisent un capteur infrarouge non dispersif. Une molécule de CO₂ absorbe l'infrarouge à une largeur de bande en particulier, ce qui permet de la quantifier avec un risque minimal d'interférence. Il existe également d'autres types de capteurs qui devraient bien fonctionner.

Les appareils de mesure et d'enregistrement du CO₂ servant à évaluer l'étanchéité à l'air doivent répondre aux exigences suivantes :

- Ils doivent avoir une batterie suffisamment puissante pour la durée de l'expérience (quatre jours ou plus).
- Ils doivent pouvoir mesurer le CO₂ jusqu'à une concentration de 4 000 ppm au minimum.
- Ils doivent avoir une précision de ± 50 ppm ou mieux.

- Ils doivent idéalement comprendre une fonction d'acquisition de données pour enregistrer les valeurs automatiquement. La capacité de mémoire n'est pas déterminante, puisque tout enregistreur de données est capable de stocker beaucoup plus de données que ce qu'il est nécessaire pour établir l'étanchéité à l'air d'un contenant.
- Ils doivent pouvoir être étalonnés simplement à la main. Il faut s'assurer que l'enregistreur ne fonctionne pas strictement avec un étalonnage automatique de fond et prendre soin de vérifier la méthode sélectionnée s'il existe différentes options dans les paramètres de l'appareil. Par exemple, certains enregistreurs s'étalonnent automatiquement à intervalles quotidiens ou hebdomadaires. Il est préférable d'éviter d'utiliser ces appareils.
- Ils doivent offrir une fonction de transfert direct des données par radiofréquence (comme la communication Bluetooth) et permettre ainsi une lecture immédiate des données. À défaut, l'enregistreur peut être doté d'un écran à cristaux liquides pour des lectures directes. Cependant, dans certains cas, il se peut qu'il soit impossible de voir l'écran de l'extérieur de la vitrine d'exposition.
- Ils doivent pouvoir mesurer la température et l'HR en même temps que la concentration de CO₂, à moins que l'on utilise également un autre dispositif de surveillance.

Pour déterminer l'étanchéité à l'air d'un contenant, il n'est pas essentiel de procéder à un étalonnage précis de l'appareil, puisque le résultat de l'essai se fonde sur des valeurs relatives de CO₂ plutôt que sur des valeurs absolues. Un niveau de fond de 400 ppm et une lecture à un instant X de 3 000 ppm permettent de calculer la même étanchéité à l'air que si l'appareil de mesure indique 600 ppm comme niveau de fond et 3 200 ppm au même instant X. L'étalonnage devient crucial si l'on utilise plus d'un appareil de mesure en même temps, par exemple si l'un lit le niveau de CO₂ à l'intérieur du contenant de protection, tandis que l'autre lit le niveau à l'extérieur du contenant.

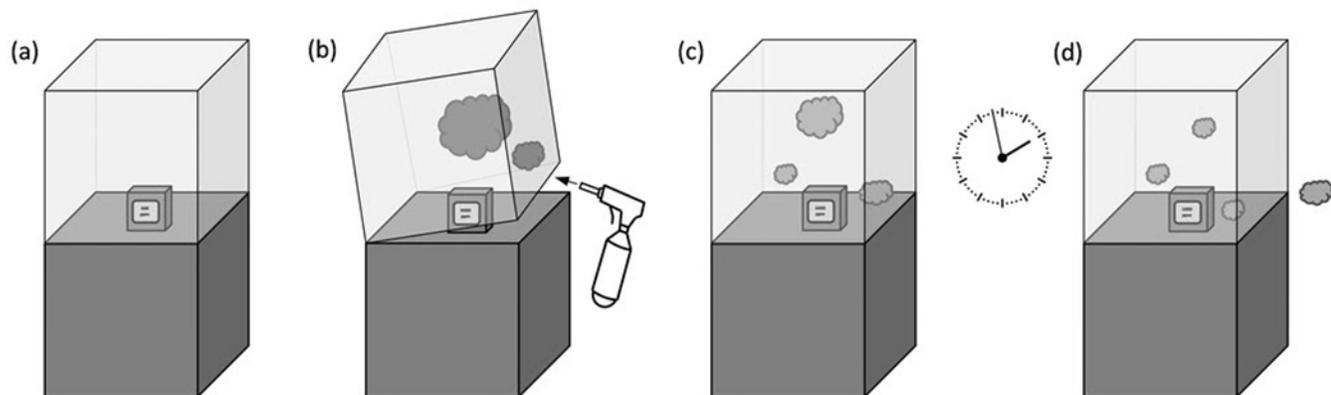
La précision de l'appareil n'est pas non plus déterminante. Les appareils de mesure du CO₂ que l'on trouve facilement sur le marché offrent généralement une précision oscillant entre 3 % et 10 %. Aucune différence dans la valeur d'étanchéité à l'air n'a été constatée avec des appareils de mesure offrant une précision de 3 % par rapport à une précision de 5 %. Le coefficient de détermination multiple (R^2), un indicateur de la stabilité de la lecture, n'est que légèrement inférieur pour un appareil de mesure offrant une précision de 5 % par comparaison avec un appareil offrant une précision de 3 %.

Un appareil de mesure offrant une précision de 5 % ou moins empêcherait probablement la dérive du signal dans le temps. La dérive du signal lors de la période de temps nécessaire à l'expérience (diminution de la concentration de CO₂) n'est certainement pas souhaitable. Il est possible d'atténuer le risque d'un tel effet de dérive quant à la détermination de l'étanchéité à l'air, à tout le moins pour le niveau de fond, en prenant la valeur moyenne du niveau de CO₂ au début et à la fin de l'expérience avec le même appareil de mesure.

Protocole

Ce protocole pour déterminer l'étanchéité à l'air d'une vitrine d'exposition ou de tout autre type de contenant de protection est fondé sur la méthode de détection des fuites par gaz traceur employant du CO₂. La figure 13 illustre les principales étapes de la procédure. Pour commencer, il est préférable d'effectuer l'essai avec une vitrine d'exposition vide afin de limiter le nombre de facteurs d'influence. Si l'objectif est d'avoir une vitrine

très étanche à l'air, il est recommandé, avant de réaliser l'expérience, de chercher des points de fuite, puis de les colmater. Consulter [Détection des points de fuite](#) ainsi que l'[annexe A](#), qui contient également une liste de contrôle pour le protocole.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0021

Figure 13. Les étapes de base de la quantification de l'étanchéité à l'air des vitrines d'exposition à l'aide de CO₂ : a) installer un appareil de mesure de CO₂ dans la vitrine d'exposition; b) ajouter du CO₂ à titre de gaz traceur; c) refermer la vitrine d'exposition comme il se doit; et d) enregistrer la diminution de la concentration de CO₂ dans le temps.

Consigner les caractéristiques de la vitrine d'exposition

Le fait de consigner certains détails concernant la conception de la vitrine d'exposition, le contrôle de l'environnement, la composition des objets et les conditions climatiques (HR et température) peut aider à expliquer les anomalies potentiellement révélées par la courbe de diminution de la concentration de CO₂.

- Noter si des objets poreux ou des socles ayant un volume interne important (cavité) sont présents dans la vitrine d'exposition. Une image de la vitrine testée peut s'avérer utile ultérieurement pour vérifier les détails.
- Noter la présence de gel de silice et de charbon actif dans le compartiment pour le contrôle de l'environnement.
- Consigner la température à l'intérieur de la vitrine tout au long de l'expérience à l'aide d'un appareil de mesure du CO₂ ou de tout autre appareil de surveillance, au besoin.
- Pour les armoires de mise en réserve ou les caisses de transport, noter si certains objets sont placés dans des contenants de protection plus petits, comme des sacs en plastique bien scellés ou des boîtes en carton bien fermées.
- Indiquer l'emplacement de la vitrine testée (bâtiment et pièce).

Configuration de l'enregistreur de données de surveillance du CO₂

- Le taux d'acquisition des données peut être réglé par défaut à des intervalles de 30 minutes. Cela permet d'obtenir une résolution suffisante pour les vitrines non étanches (taux d'échange d'air supérieur à 1/jour). Le taux d'acquisition des données peut être réduit à des intervalles allant d'une à trois heures pour les vitrines d'exposition plus étanches (taux d'échange d'air inférieur à 1/jour).
- Étalonner l'appareil de mesure du CO₂ conformément aux directives du fabricant, s'il y a lieu. Cette opération peut être effectuée quelques heures ou quelques jours avant le début de l'expérience. Il est nécessaire de procéder à un étalonnage si l'on utilise plus d'un appareil de mesure.
- Placer l'appareil de mesure à l'extérieur de la vitrine d'exposition et le mettre en marche. Il faut s'assurer que personne ne demeure à proximité de l'appareil de mesure pour éviter toute source indésirable de CO₂. Cette valeur sera utilisée comme niveau de fond de CO₂.
- Installer l'appareil de mesure dans la vitrine d'exposition. L'air doit pouvoir bien circuler autour de l'appareil. Si l'on utilise plus d'un appareil, on peut également en installer un à l'extérieur de la vitrine. L'enregistrement du niveau de CO₂ dans les différents compartiments peut aussi aider à comprendre les caractéristiques dynamiques de la vitrine d'exposition, comme le temps de réaction du sorbant d'humidité dans le compartiment pour le contrôle de l'environnement (l'efficacité avec laquelle il peut contrôler le volume d'air du compartiment d'exposition de la vitrine). Lorsque la vitrine d'exposition offre un accès séparé à un compartiment pour le contrôle de l'environnement, il peut s'agir d'un moyen plus simple d'insérer l'appareil de mesure de CO₂ sans avoir à ouvrir la section de la vitrine servant à l'exposition d'objets.

Injection de gaz

- Fermer la vitrine d'exposition en laissant une ouverture aussi petite que possible pour l'injection du CO₂. La petite ouverture peut se situer au niveau du compartiment pour le contrôle de l'environnement.
- Injecter le CO₂ pour atteindre la concentration prédéterminée. Le niveau de départ doit se situer entre 3 000 ppm et 6 000 ppm. Si l'on commence à une concentration bien inférieure à 3 000 ppm, on risque de ne pas obtenir une plage de diminution de la concentration suffisante pour déterminer l'étanchéité à l'air (en particulier pour les vitrines présentant des fuites plus importantes). En outre, il n'est pas nécessaire de dépasser une concentration de 6 000 ppm.
- Sceller ou fermer la vitrine comme il se doit lorsque le niveau de CO₂ interne souhaité est atteint. Dans la mesure du possible, éviter les activités autour de la vitrine qui peuvent avoir une incidence sur le niveau de fond de CO₂ pendant l'expérience.

En règle générale, il faut injecter 2 g de CO₂ par tranche de 1 000 ppm requise par mètre cube. Par exemple, si l'objectif est d'obtenir une concentration de 4 000 ppm de CO₂ dans une vitrine de 1 m³, il faudra injecter 8 g de CO₂. Si l'on utilise une cartouche de 12 g, après une injection de 8 g, les 4 g restants généreront seulement une concentration de 2 000 ppm dans une autre vitrine de 1 m³.

Il faut faire des expériences afin de déterminer combien de temps est nécessaire pour vider une cartouche de CO₂ avec l'appareil d'injection utilisé, puis d'estimer le temps requis pour atteindre une concentration en particulier. Il faut garder à l'esprit qu'une partie du CO₂ sera également libérée dans la pièce pendant

l'injection. Ajouter un tube d'extension à la buse de décharge peut aider à diriger le gaz dans une petite ouverture de la vitrine, et ainsi réduire au minimum la propagation de CO₂ dans la pièce.

On remarquera, lors de la décharge de CO₂, que la tête de l'injecteur et le cylindre deviennent très froids. Ce phénomène est normal et attribuable au développement adiabatique, soit une transformation thermodynamique due à un changement rapide de la pression. Certains injecteurs ne sont pas munis de manchon extérieur de protection, et l'on doit par conséquent tenir le cylindre dans sa main. Lorsqu'on utilise ce type d'équipement, on doit veiller à ne pas toucher directement le cylindre métallique froid. Un manchon en néoprène est souvent fourni avec un ensemble d'injecteurs à titre d'isolant.

Il convient également de noter que, lorsque l'environnement est humide, du givre peut se former sur la buse de décharge et l'obstruer. En pareil cas, il faut attendre que la buse de décharge se réchauffe avant de poursuivre l'injection de CO₂.

On utilise parfois un ventilateur miniature à pile pour accélérer la dispersion du CO₂. Cela peut être particulièrement utile pour les essais préliminaires effectués sur une courte période. On peut l'utiliser pendant les cinq à dix premières minutes, mais pas pendant toute la durée de l'essai. Un ventilateur dans un petit contenant de protection peut réduire la valeur d'étanchéité à l'air mesurée, comme on peut le voir dans [Étude de cas 4 : l'effet d'un ventilateur](#).

Il est recommandé d'attendre au moins cinq minutes après avoir ajouté une première quantité de CO₂ avant de vérifier si la concentration est suffisante. Si le niveau est trop bas, il faut injecter Méthodes de calcul de l'étanchéité à l'air u CO₂ supplémentaire et réévaluer la concentration après cinq minutes. Deux options sont possibles si la lecture atteint l'échelle maximale de l'appareil de mesure :

- Accepter que l'essai prenne plus de temps pour que la concentration diminue et tombe dans la plage de mesure.
- Essayer d'évacuer une partie du gaz en ouvrant légèrement la vitrine jusqu'à ce que la concentration souhaitée soit atteinte.

Pour la première option, cela peut prendre des heures, voire des jours avant d'atteindre la plage de mesure de l'appareil avec un excès de CO₂ dans une vitrine étanche à l'air. Le problème de la seconde option est le délai entre le réglage de la concentration et la lecture de la nouvelle valeur. Il est facile d'osciller entre trop et trop peu de CO₂ jusqu'à ce que l'on ait acquis une certaine expérience de la méthode d'essai.

Durée de l'essai de diminution de la concentration

Voici des lignes directrices simples concernant la durée de l'essai :

- Faire un essai pendant 7 à 16 heures (journée de travail complète ou nuit) pour obtenir des résultats préliminaires ou effectuer un contrôle de la fabrication.
- Procéder à un essai pendant quatre jours aux fins d'attestation (y compris la période de stabilisation, mais sans la période où la concentration est supérieure à la limite de l'appareil de mesure de CO₂).

La justification de la durée est détaillée dans l'étude de cas 5. Il convient de noter que la période de stabilisation fait référence au temps nécessaire pour atteindre une concentration initiale uniforme de CO₂ dans le contenant de protection. Ce sujet est abordé sous [Méthodes de calcul de l'étanchéité à l'air](#) et [Étude de cas 5 : justification de la durée de l'essai](#).

Fin de l'enregistrement des données

- Si l'on se sert d'un seul appareil de mesure du CO₂, on doit le placer, à la fin de l'essai, à l'extérieur de la vitrine d'exposition pour obtenir des données utiles concernant la concentration à l'extérieur. Comme indiqué précédemment, il faut s'assurer que personne ne se trouve à proximité de l'appareil de mesure pour éviter toute source indésirable de CO₂. Cette valeur supplémentaire servira à déterminer le niveau de fond moyen de CO₂ à l'aide des valeurs enregistrées au début et à la fin de l'essai.
- Télécharger les données de l'enregistreur de CO₂ dans un logiciel tableur tel qu'Excel pour les analyser.

Méthodes de calcul de l'étanchéité à l'air

Deux approches sont décrites pour déterminer l'étanchéité à l'air d'un contenant de protection : la méthode de diminution de la concentration en deux points et la méthode de diminution de la concentration en plusieurs points. La méthode de diminution de la concentration en deux points est utile pour procéder à une évaluation rapide, comme le contrôle de la fabrication ou de l'assemblage. La méthode de diminution de la concentration en plusieurs points peut être utilisée à des fins similaires ainsi que pour l'attestation. Cette dernière méthode nécessite plus de données et, de manière générale, plus de temps, mais elle donne des résultats plus précis. L'examen de ces points de données permet également de vérifier si le niveau de CO₂ est suffisamment uniforme dans les différentes parties du contenant de protection. Cette période est définie ici comme la période de stabilisation. En outre, la méthode de diminution de la concentration en plusieurs points met en évidence le moment où un fond de CO₂ parasite (fluctuant) commence à altérer le processus de diminution de la concentration régulière. Les deux méthodes sont décrites plus en détail ci-dessous.

Outil de calcul de l'étanchéité à l'air

[Feuille de calcul Excel](#), (80 Ko)

L'ICC a créé un outil dans Excel qui illustre les deux approches servant à déterminer l'étanchéité à l'air des contenants de protection. L'outil utilise des données à titre d'exemple avec les équations 5 et 6 pour créer des graphiques semblables aux figures 14 et 15 du présent Bulletin. Les utilisateurs peuvent entrer leurs propres données pour produire des graphiques personnalisés en téléchargeant le fichier.

Méthode de diminution de la concentration en deux points

Après avoir recueilli des données montrant la diminution de la concentration du gaz traceur au fil du temps, la façon la plus simple de calculer l'étanchéité à l'air est d'utiliser l'équation 4 (Brimblecombe et Ramer, 1983). Cette méthode consiste à prendre des points de données (concentrations de gaz traceur et temps de mesure) au

début et à la fin de la période d'intérêt. Le point de départ est choisi après la stabilisation du gaz traceur dans le contenant de protection et le point de fin, lorsque la concentration est supérieure d'au moins 600 ppm au niveau de fond dans la pièce.

Équation 4 :

$$N = \ln \frac{C_{in1}}{C_{ex}} - \ln \frac{C_{in2}}{C_{ex}} \Delta t$$

Où

N = étanchéité à l'air (1/jour)

\ln = logarithme naturel

C_{in1} = concentration à l'intérieur du gaz traceur au début de l'essai (en ppm)

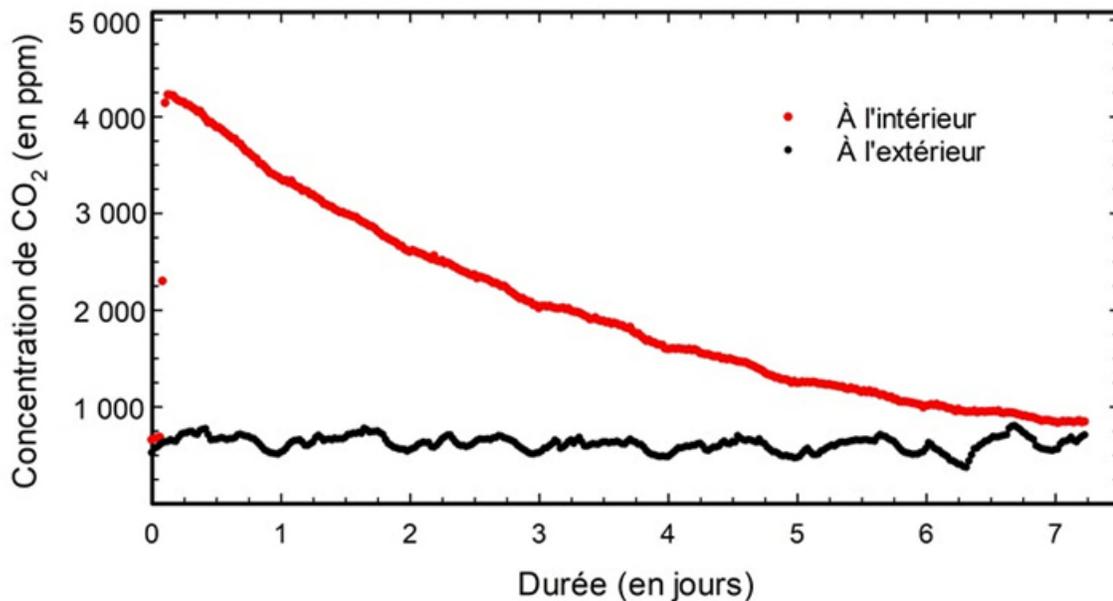
C_{in2} = concentration à l'intérieur du gaz traceur à la fin de l'essai (en ppm)

C_{ex} = concentration à l'extérieur (dans la pièce) du gaz traceur (en ppm)

Δt = durée entre les mesures de C_{in} (en jours)

On peut établir la concentration de CO₂ à l'extérieur (C_{ex}) en prenant une mesure dans la pièce immédiatement avant ou après l'essai ou en faisant la moyenne de ces deux mesures. Si l'on dispose d'un enregistreur de données supplémentaire, on peut déterminer le fond moyen de CO₂ pendant toute la durée de l'essai.

À titre d'exemple, la figure 14 montre la diminution de la concentration de CO₂ dans un contenant en plastique de 0,063 m³ qui ne présentait aucun interstice évident visible à l'œil nu. Un appareil de mesure a été placé à l'intérieur du contenant et un autre a été placé dans la pièce. Le taux d'acquisition de données a été réglé à des intervalles de 30 minutes, et la concentration moyenne à l'extérieur était de 613 ppm. L'injection a commencé à environ 2 heures, et un niveau maximal de 4 222 ppm de CO₂ a été atteint vers 3 heures.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0023

Figure 14. Diminution de la concentration de CO₂ dans un contenant en plastique et concentration correspondante dans la pièce.

Le tableau 1 présente cinq ensembles de deux points tirés des données de la figure 14 et montre la variation de l'étanchéité à l'air qui en découle. Les ensembles 1 et 2 représentent une évaluation typique à court terme de l'étanchéité à l'air pendant une seule journée de travail. L'ensemble 2 a été sélectionné en tant que 2 points décalés de 30 minutes par rapport à l'ensemble 1. L'ensemble 3 représente également une évaluation à court terme, mais sur une période d'une nuit. L'ensemble 4 utilise des données couvrant environ 4 jours (96 heures), puisque cette durée permet une détermination précise de l'étanchéité à l'air. L'ensemble 5 utilise une échelle de temps encore plus longue, soit de 4 heures après le début de l'essai à l'heure de fin (127 heures). L'heure de fin correspond au temps requis pour atteindre la concentration limite finale (1 215 ppm \approx 613 ppm + 600 ppm). Consulter [Étude de cas 5 : justification de la durée de l'essai](#) pour obtenir une justification des quatre jours et la définition de la concentration limite finale.

Tableau 1 : Ensembles de deux points pour la détermination de l'étanchéité à l'air

Ensemble	C_{in1} (en ppm)	t_1 (en heures)	C_{in2} (en ppm)	t_2 (en heures)	Durée (en jours)	N (1/jour)
1	4 218	3,5	4 015	9,5	0,25	0,23
2	4 213	4	3 976	10	0,25	0,27
3	4 213	4	3 512	20	0,67	0,32
4	4 213	4	1 591	96	3,83	0,34
5	4 213	4	1 215	127	5,13	0,35

Avec l'équation 4, l'étanchéité à l'air calculée varie en fonction des différentes paires de points choisies sur la figure 14 et répertoriées dans le tableau 1.

Exemple avec l'ensemble 1 :

$$N = [\ln(C_{in1} - C_{ex}) - \ln(C_{in2} - C_{ex})] / (t_2 - t_1)$$

$$N = (\ln(4\,218 - 613) - \ln(4\,015 - 613)) / ((9,5 - 3,5)/24)$$

$$N = 0,23/\text{jour}$$

L'ensemble 1 indique une étanchéité à l'air de 0,23/jour, déterminée à l'aide des données enregistrées à 3,5 heures et à 9,5 heures. L'ensemble 2 donne une valeur légèrement plus élevée de 0,27/jour, déterminée à l'aide des données enregistrées à 4 heures et à 10 heures. Le délai de 30 minutes a permis un mélange optimal des gaz dans le contenant de protection. L'ensemble 3 couvre une plage de 16 heures (0,67 jour) et donne une étanchéité à l'air de 0,32/jour. L'ensemble 4 donne une étanchéité à l'air de 0,34/jour avec une période finale de 4 jours. Enfin, l'ensemble 5 donne une étanchéité à l'air de 0,35/jour, déterminée à l'aide de la période la plus longue, allant jusqu'à la limite pratique de concentration. L'écart d'étanchéité à l'air entre les ensembles 4 et 5 n'est que de 3 %, ce qui confirme la précision obtenue avec une période de 4 jours.

Méthode de diminution de la concentration en plusieurs points

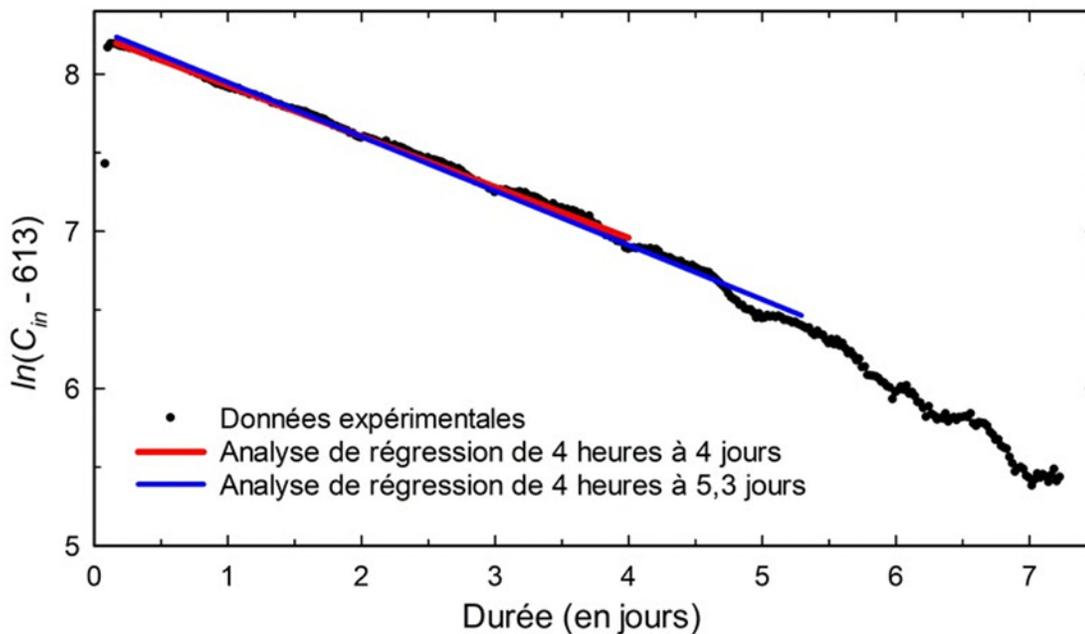
La seconde façon de déterminer l'étanchéité à l'air consiste à tenir compte de toutes les données à l'aide d'un graphique sous la forme de $\ln(C_{in} - C_{ex})$ en fonction du temps. La pente de la ligne de régression correspond à l'étanchéité à l'air. Il convient de noter que la pente est négative, puisque le gaz traceur quitte le contenant de protection; cependant, la valeur de l'étanchéité à l'air est positive. Un logiciel tableur, tel Excel, vous aidera dans cette analyse de régression, car il en offre un meilleur ajustement linéaire. Les données doivent avoir le format suivant : la colonne de l'axe des x est le temps en jours, alors que la colonne de l'axe des y est la valeur $\ln(C_{in} - C_{ex})$ correspondante. La fonction « =PENTE($Y1:Y2, X1:X2$) » donne l'étanchéité à l'air globale.

Une solution de rechange à la fonction de pente est la fonction linéaire « courbe de tendance » dans les outils graphiques. Cet outil donne une équation linéaire permettant d'obtenir la pente et le R^2 . Dans ce cas, un R^2 élevé (où 1 indique une ligne droite parfaite sans variation) représente une surveillance stable et une absence d'influences externes sur le processus de diminution de la concentration. Un R^2 inférieur à 0,990 est probablement le signe d'une relation non linéaire. Dans ce cas, il faut relever la cause possible, comme un environnement externe instable ou le choix d'une période mal adaptée à l'analyse. Il faut refaire l'essai si la cause possible est liée à une diminution de la concentration instable du CO_2 au début ou à la fin de l'essai.

La figure 15 montre un tracé de $\ln(C_{in} - 613)$ en fonction du temps à l'aide des mêmes données que celles de la figure 14. Une étanchéité à l'air de 0,32/jour avec un $R^2 = 0,997$ est obtenue sur une période de 4 heures à 4 jours. Avec une période allant de 4 heures à la limite finale (5,3 jours), une étanchéité à l'air de 0,35/jour est indiquée avec un R^2 de 0,994. La différence d'étanchéité à l'air entre ces deux analyses de régression et les méthodes à deux points (ensembles 4 et 5 dans le tableau 1) est inférieure à 5 %. Sur la figure 15, après

5,3 jours, les données expérimentales ne suivent pas un modèle linéaire en raison de l'influence du fond fluctuant de CO₂. Cela montre que la détermination de l'étanchéité à l'air fondée sur quatre jours est suffisamment précise et qu'une période supplémentaire ne permettrait pas d'obtenir un meilleur résultat.

La stabilisation a pris environ une heure, ce qui est difficile à voir sur la figure 15. Lorsqu'elle prend plus de temps, par exemple de nombreuses heures, la période devient plus évidente avec l'analyse de régression. Consulter [Étude de cas 6 : vitrine d'exposition à compartiments multiples](#) pour obtenir un exemple de période de stabilisation très longue avec une vitrine à deux compartiments.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0025

Figure 15. Diminution de la concentration de CO₂ dans un contenant de protection exprimée par le logarithme naturel de la concentration de CO₂ moins la valeur à l'extérieur dans la pièce (613 ppm) en fonction du temps. Deux analyses de régression portant sur des périodes différentes sont représentées (lignes droites) pour la détermination de l'étanchéité à l'air.

Reproductibilité

Comme mentionné précédemment, la précision de l'appareil de mesure du CO₂ donne un taux d'erreur de l'ordre de 3 % à 5 % (consulter [Surveillance des gaz traceurs et enregistreurs de données](#)), et il est raisonnable de supposer une certaine dérive des lectures du capteur avec le temps. L'ouverture du contenant de protection entre les essais a aussi une incidence sur la reproductibilité.

Pour examiner la reproductibilité globale de la détermination de l'étanchéité à l'air, un vaisselier qui a été amélioré de sorte à être plus hermétique a été testé trois fois à l'aide de trois appareils de mesure du CO₂. Les

résultats ont donné un taux de reproductibilité de la détermination de l'étanchéité à l'air de 14 %. Les détails de ces essais sont rapportés sous [Étude de cas 7 : erreur et reproductibilité](#).

Calver et coll. (2005) ont effectué une vérification similaire avec une vitrine en acrylique en effectuant plus de 25 essais et ont obtenu un écart type relatif de 11 %. English Heritage a testé environ 400 vitrines d'exposition et établi un taux de reproductibilité raisonnable de 20 % pour la plupart des vitrines. Cependant, certaines vieilles vitrines en bois à charnières peuvent présenter des écarts allant jusqu'à 40 % (Thickett et coll., 2005; Thickett, 2021).

À partir de ces trois enquêtes, nous pouvons supposer de manière conservatrice que, d'un essai à l'autre, le taux de reproductibilité des valeurs d'étanchéité à l'air est de l'ordre de 20 %. Par exemple, si la valeur exacte de l'étanchéité à l'air d'une vitrine est de 0,30/jour, deux mesures peuvent donner un résultat aussi bas que 0,24/jour et aussi élevé que 0,36/jour. Les vitrines testées en usine peuvent présenter des valeurs différentes d'étanchéité à l'air après avoir été déplacées et installées à leur emplacement final. Il faut également garder à l'esprit que l'étanchéité à l'air d'un contenant de protection peut diminuer en raison de la fatigue ou de l'usure de même que de la déformation et du désalignement des matériaux.

Rapport sur l'étanchéité à l'air

Le rapport doit inclure les renseignements suivants, s'il y a lieu. Des exemples de données sont fournis et se fondent sur les résultats présentés à la figure 15.

- Inclure une description de la vitrine d'exposition testée. Fournir des renseignements tels que le lieu de l'essai, le volume de la vitrine d'exposition et les principaux matériaux constitutifs de la vitrine, et donner une description de ce qu'il y a dans la vitrine si celle-ci n'est pas vide.
- Inclure l'instrument utilisé et indiquer le protocole suivi, par exemple le présent Bulletin technique, la norme 12569:2017 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO, 2017) [en précisant les sections utilisées] ou votre propre protocole personnalisé.
- Inclure la figure représentant le logarithme naturel de la concentration de dégradation du CO₂ moins le niveau de fond en fonction du temps. La plage de temps utilisée pour la méthode de diminution de la concentration en plusieurs points doit être visible sur la figure. Cela montrera clairement que la période de stabilisation et les données au-delà de la limite finale ont été exclues de l'analyse de régression.
- Rappporter le niveau de CO₂ à l'extérieur à partir d'une lecture ou de la moyenne de nombreuses lectures (par exemple, le niveau de fond de CO₂ est de 613 ppm pris à partir de deux mesures : avant l'injection du gaz traceur et à la fin de l'expérience).
- Rappporter l'étanchéité à l'air (par exemple, l'étanchéité à l'air mesurée à l'aide de CO₂ est de 0,32/jour avec un $R^2 = 0,997$ ou $N_{CO_2} = 0,32/\text{jour}$, $R^2 = 0,997$). En général, seuls deux chiffres significatifs sont nécessaires pour indiquer l'étanchéité à l'air (X,X/jour, 0,XX/jour ou 0,0XX/jour).
- Indiquer l'écart type ou l'écart type relatif si trois essais ou plus ont été effectués (consulter [Étude de cas 7 : erreur et reproductibilité](#)).
- Indiquer la température et l'HR dans la pièce ou dans la vitrine d'exposition (enregistrées pendant l'essai si c'est pertinent). Des fluctuations significatives de la température peuvent expliquer certains

écarts dans l'analyse de régression (consulter [Étude de cas 3 : l'effet de la température sur la teneur en CO₂ à l'équilibre](#)).

- Inclure le nom de la ou des personnes qui ont effectué l'essai et les dates de début et de fin de l'essai.
- Inclure un avis de non-responsabilité, s'il y a lieu, avec l'aide de votre avocat. À titre d'exemple : la vitrine X a été testée dans votre établissement selon le protocole XYZ. Malgré toutes les précautions prises, nous ne pouvons pas garantir la même étanchéité à l'air de la vitrine au moment de son utilisation. Le taux de reproductibilité de la détermination de l'étanchéité à l'air peut atteindre 20 %.

L'étanchéité à l'air comme spécification

Il n'existe pas de norme mondialement reconnue concernant l'étanchéité à l'air des vitrines, et ce, malgré l'utilisation répandue de normes pour maintenir l'HR et les polluants sous des seuils acceptables. Certains musées, principalement au Royaume-Uni, exigent une étanchéité à l'air de l'ordre de 0,1/jour à 1,0/jour pour les nouvelles vitrines et armoires pour la mise en réserve. Certains musées exigent même un taux d'échange d'air de 0,01/jour. Cette section présente une brève revue des spécifications relatives à l'étanchéité à l'air.

Au Royaume-Uni, Padfield (1966) a été le premier à rapporter une valeur numérique pour l'étanchéité à l'air d'une vitrine en utilisant de la vapeur d'eau. Il a constaté que les vitrines conventionnelles (de bonne facture) ont une étanchéité à l'air d'environ 0,9/jour. Plus tard, Thomson (1977) a mesuré l'étanchéité à l'air avec de la vapeur d'eau et relevé une étanchéité à l'air de 13/jour pour une vitrine dont les vitres sont mal ajustées et de 1,3/jour pour une vitrine de bonne facture. À la lumière de ces résultats, Thomson a suggéré qu'une vitrine de bonne facture ne devait pas présenter un taux de fuite supérieur à 1/jour. Il a utilisé cette étanchéité à l'air pour élaborer sa recommandation concernant la quantité de gel de silice nécessaire dans les vitrines d'exposition d'un volume donné.

La British Standards Institution (BSI) a publié des recommandations concernant la mise en réserve et l'exposition de documents d'archives (BSI, 1977). Ces recommandations comprenaient des spécifications sur l'étanchéité à l'air des vitrines. Contrairement à ce qu'avait suggéré Thomson, cette norme stipulait que la structure d'une vitrine devait permettre une infiltration d'air suffisante et que les points de ventilation devaient être dotés de filtres à poussière. À cette époque, l'objectif était probablement de réduire au minimum le risque d'infiltration d'humidité (un problème courant au Royaume-Uni) et le risque lié à l'émanation de composés nocifs des matériaux à l'intérieur de la vitrine (Padfield, 1966).

En 1989, la BSI a mis à jour ses recommandations. L'étanchéité à l'air des vitrines a alors été liée au contrôle de l'HR dans la pièce.

- Lorsque l'HR est bien contrôlée tout au long de l'année, les vitrines doivent être équipées d'un évent avec filtre à poussière.
- Lorsque l'HR n'est pas bien contrôlée, les vitrines doivent être étanches à l'air et comporter du gel de silice.

Au début des années 1990, un changement majeur s'est produit lorsque le Victoria and Albert Museum a commencé à exiger que ses vitrines d'exposition affichent une étanchéité à l'air de 0,1/jour (Cassar et Martin,

1994). Les expériences de Cassar et Martin ont été réalisées avec le N₂O comme gaz traceur. L'exigence d'une étanchéité à l'air élevée s'appuyait sur le fait qu'il était désormais possible pour les fabricants de vitrines d'offrir ce genre de rendement sans qu'il y ait une incidence significative sur le coût de production ni qu'il soit nécessaire de faire des essais approfondis. Avant d'en arriver à cette spécification, Cassar et Martin ont testé 13 vitrines de différents fabricants. L'étanchéité à l'air moyenne était de 0,9/jour avec un écart type de 1,1/jour. Les deux meilleures vitrines ont affiché une étanchéité à l'air de 0,10/jour et de 0,15/jour respectivement et les deux pires vitrines, de 2,64/jour et de 3,36/jour respectivement.

Bien entendu, il faut accorder une grande attention aux détails pour atteindre le taux d'échange d'air cible de 0,1/jour. Pour éviter les attentes irréalistes, Cassar et Martin (1994) ont suggéré qu'en fonction des fonds dont on dispose, les objets nécessitant un contrôle strict de l'HR soient placés dans des vitrines particulièrement étanches à l'air et que les autres le soient dans des vitrines moins étanches à l'air.

Le Museums, Libraries and Archives Council du Royaume-Uni s'est lui aussi mis à exiger une étanchéité à l'air de 0,1/jour (Holmberg et Kippes, 2002). Ultérieurement, on a constaté qu'il n'est pas toujours facile d'obtenir cette étanchéité à l'air à faible coût (Thickett et coll., 2005; Watts et coll., 2007), car peu de fabricants de vitrines possèdent les compétences requises. Cela peut expliquer pourquoi des établissements du monde entier demandent une étanchéité à l'air comprise entre 0,1/jour et 1,0/jour. On suppose que cette étanchéité à l'air a été déterminée à l'aide d'un gaz traceur, comme le CO₂ ou le N₂O. En réalité, à l'heure actuelle, la plupart des établissements ne précisent pas quelle doit être l'étanchéité à l'air de leurs vitrines d'exposition.

En 1999, le National Park Service des États-Unis (NPS) a établi des catégories d'efficacité de scellement des vitrines, allant de « non scellée » à « scellée hermétiquement ». Ces catégories ont été mises à jour en 2020 et sont présentées dans le tableau 2. L'étanchéité à l'air recommandée d'un échange d'air toutes les 72 heures (1/72 heures = 0,333/jour ≈ 0,3/jour) est demeurée inchangée (Wiki de l'AIC, 2020).

Tableau 2 : Degré d'étanchéité d'une vitrine d'exposition (Wiki de l'AIC, 2020)

Degré d'étanchéité de la vitrine	Taux d'échange d'air approximatifs (par jour comme référence) fondés sur la norme de 1999 du NPS (norme originale)	Taux d'échange d'air (avec CO ₂ ou N ₂ O) tiré du Wiki de l'AIC, 2020 (remplace la norme de 1999 du NPS)
I. Non scellée	1 échange d'air par heure ou moins (≥ 24/jour)	> 1,0/jour
II. Scellée modérément	1 échange d'air par 24 à 36 heures (1 à 0,67/jour)	≤ 1,0/jour
III. Bien scellée	1 échange d'air par 72 heures ou plus (≤ 0,33/jour)	≤ 0,3/jour
IV. Très bien scellée	–	≤ 0,1/jour
V. Scellée hermétiquement	aucun échange d'air	–

Il est important de préciser le gaz traceur, l'équation et la méthode employés pour déterminer l'étanchéité à l'air dans la demande de propositions ou le rapport de détermination de l'étanchéité à l'air. Il peut être nécessaire de convertir la diffusivité des gaz pour les vitrines très étanches à l'air (par exemple, si le but de l'étanchéité à l'air est le contrôle de la vapeur d'eau avec du gel de silice et que l'étanchéité à l'air a été déterminée avec du CO₂). Consulter l'[annexe B](#) pour savoir quand cette conversion est appliquée.

Au moment de déterminer l'étanchéité à l'air, certains paramètres environnementaux, telles les fluctuations quotidiennes de la pression atmosphérique, de l'intensité lumineuse et de la température, peuvent avoir une incidence sur les résultats obtenus. Par ailleurs, il se peut que l'assemblage de la vitrine soit légèrement altéré pendant le transport ou l'installation de cette dernière. Ce problème lié à la reproductibilité est abordé sous [Étude de cas 7 : erreur et reproductibilité](#). Les fabricants de vitrines peuvent être contraints de concevoir des vitrines ayant un taux d'échange d'air inférieur à ce qui est demandé afin d'être certains de respecter les exigences. En revanche, un client peut accepter certaines plages de tolérance. Par exemple, un établissement peut demander une étanchéité à l'air de 0,30/jour alors que, lors des essais sur place, une étanchéité à l'air allant jusqu'à 0,50/jour peut demeurer acceptable à ses yeux. L'étanchéité à l'air visée et la plage de tolérance ou les critères de rejet doivent être clarifiés au préalable par les deux parties.

Il est important de garder à l'esprit que la stabilité des conditions environnementales dans une pièce peut avoir une incidence significative sur la détermination de l'étanchéité à l'air. On observe un meilleur rendement lorsque les essais sont effectués dans des environnements plus stables que l'emplacement final du contenant de protection. Pour éviter les surprises, les fabricants de contenants de protection doivent connaître les conditions environnementales qui prévalent chez le client. Ils devraient fournir la plage de températures ou les températures enregistrées tout au long de la mesure de la décroissance du CO₂.

Étant donné que l'optimisation du contrôle de l'environnement dans les vitrines d'exposition repose souvent sur l'étanchéité à l'air spécifiée, il est juste que les établissements exigent dans leur demande de propositions la preuve d'une étanchéité à l'air donnée, obtenue soit à l'usine soit à l'emplacement final de la vitrine. Les établissements peuvent également vérifier eux-mêmes l'étanchéité à l'air sur place ou demander une évaluation indépendante de leur vitrine.

Il peut également être intéressant de vérifier la stabilité de l'étanchéité à l'air au fil du temps. Des facteurs tels que le vieillissement des matériaux, la fréquence d'accès à l'intérieur de la vitrine, les déformations et les vibrations peuvent avoir une incidence sur l'étanchéité à l'air. À l'heure actuelle, il n'existe pas de garantie connue en ce qui concerne le rendement des vitrines quant à l'étanchéité à l'air après un ou trois ans. Un dialogue peut se développer entre les clients et les fabricants de vitrines afin de vérifier l'étanchéité à l'air quelques années après l'installation et de clarifier qui sera responsable de la mise à niveau des vitrines. Cette mesure supplémentaire et l'éventuelle mise à niveau entraîneront des coûts supplémentaires.

De manière générale, les établissements devraient déterminer eux-mêmes le niveau d'étanchéité à l'air qui répond à leurs besoins. La valeur d'étanchéité à l'air sert couramment à déterminer la quantité de gel de silice nécessaire pour les vitrines d'exposition et, par conséquent, les exigences relatives aux dimensions des compartiments de gel de silice (consulter [Étude de cas 1 : spécifier une étanchéité à l'air en fonction de l'entretien du gel de silice](#)). Pour les autres scénarios, la décision doit être prise en fonction du risque que

présentent les agents de détérioration dans un contexte donné (consulter [Agents de détérioration](#)). Dans certains contextes, il n'est pas recommandé d'utiliser des vitrines étanches, et une ventilation supplémentaire peut même être requise (consulter [Étude de cas 2 : risque de corrosion du plomb dans une vitrine d'exposition en chêne](#)).

Les autres facteurs à considérer qui peuvent dicter le niveau d'étanchéité à l'air requis comprennent les options d'atténuation, le concept du design, la plage de tolérance et le budget. Si le propriétaire et les fabricants de vitrines d'exposition ne disposent pas de l'expertise nécessaire pour déterminer l'étanchéité à l'air des vitrines d'exposition, ils peuvent faire appel à un tiers. Sinon, à titre d'option plus simple pour établir une spécification, on pourrait fixer comme critère que la vitrine d'exposition doit passer un essai à l'aide de morceaux de papier ou qu'aucune fuite ne doit être détectée à l'aide des méthodes de détection des fuites (consulter [Détection des points de fuite](#)).

Études de cas

Étude de cas 1 : spécifier une étanchéité à l'air en fonction de l'entretien du gel de silice

Au Royaume-Uni, il est difficile de maintenir un milieu sec pour les objets contenant des métaux archéologiques, comme les alliages de fer et de cuivre, en particulier dans un bâtiment ancien. Pour cette raison, on utilise souvent du gel de silice pour contrôler passivement l'humidité dans les vitrines d'exposition (figure 16).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0026

Figure 16. Le gel de silice sert couramment à contrôler les fluctuations de l'HR dans les vitrines d'exposition.

Thickett et Luxford (2007) ont donné un exemple de spécification d'étanchéité à l'air conçue pour appuyer un rendement environnemental donné dans ce scénario. Dans une pièce, l'HR se situait entre 60 % et 90 %. Une

ancienne vitrine d'exposition de 0,24 m³ comprenait des points de fuite assez importants et nécessitait 35 kg de gel de silice pour qu'une faible HR puisse se maintenir à l'intérieur. L'objectif de rendement des nouvelles vitrines était un niveau d'HR inférieur à 30 % maintenu pendant au moins 6 mois à l'aide d'une quantité raisonnable de sorbant d'humidité bien réparti. Dans ce contexte, Thickett et Luxford ont constaté que les nouvelles vitrines devaient avoir un taux d'échange d'air de 0,4/jour ou moins. Seuls 5,65 kg/m³ de gel de silice ont été nécessaires pour atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air. En prime, ils ont constaté que l'HR est restée inférieure à 30 % pendant près d'un an.

Deux hypothèses pourraient expliquer ce rendement élevé, et toutes deux sont liées aux paramètres utilisés dans l'équation 1. Le réservoir d'humidité donné (*M*) du gel de silice ordinaire utilisé était très probablement égal à 2 g/kg pour une HR de 1 %, puisque la méthodologie de Thickett et Luxford s'appuyait sur celle de Thomson (1977). Plus récemment, Tétreault et Bégin (2018) ont constaté que le gel de silice offrait un meilleur rendement à une HR inférieure à 30 % (5,5 g/kg pour une HR de 1 %). Sachant que l'HR dans la pièce était plus proche de 90 % que de 60 % pendant la période d'investigation (Thickett, 2021), la seconde hypothèse est simplement que l'étanchéité à l'air réelle était plus proche de 0,2/jour que de 0,4/jour.

Stanley et coll. (2003) ont utilisé une approche similaire. Ils souhaitaient maintenir un taux d'HR de 40 % à 60 % à l'intérieur d'une vitrine alors que l'HR de la pièce fluctuait de 35 % à 84 %, et ils souhaitaient également limiter la nécessité de reconditionner les sorbants d'humidité à des intervalles de 6 à 12 mois. Leur objectif était une étanchéité à l'air de 1/jour relativement facile à atteindre en utilisant 20 kg/m³ de sorbant, selon la recommandation de Thomson (1977).

Il convient de noter qu'il y a souvent une différence entre la théorie et la pratique. Une raison courante est que de nombreux matériaux et objets de la vitrine sont hygroscopiques et qu'ils contribuent à créer un effet tampon sur l'humidité. Les fluctuations de l'HR peuvent sembler mieux contrôlées lorsque tous les composants de la vitrine sont installés. En revanche, si la température fluctue trop, l'HR peut fluctuer plus que prévu en raison de l'effet de la température sur l'équilibre de l'humidité des différents matériaux.

Il y a un autre scénario d'intérêt, soit lorsqu'un objet massif n'est pas équilibré avec sa nouvelle vitrine où les conditions environnementales sont contrôlées. Cela peut avoir une incidence sur l'HR globale de la vitrine, même si le gel de silice a été équilibré à la valeur cible souhaitée. Une dernière différence dans la pratique peut se produire avec des vitrines très étanches à l'air, où un facteur de correction est nécessaire pour convertir l'étanchéité à l'air fondée sur le CO₂ à celle de la vapeur d'eau. Ceci est attribuable à la différence de taux d'échange d'air entre la diffusion et l'infiltration (consulter l'[annexe B](#)).

Étude de cas 2 : risque de corrosion du plomb dans une vitrine d'exposition en chêne

On constate souvent que le plomb se corrode lorsqu'un objet se trouve à proximité du chêne, qui peut faire partie du matériau de la vitrine ou d'un autre objet. Ces deux situations sont illustrées aux figures 17 et 18. Le principal composé volatil émis par le chêne est l'acide acétique, et le plomb est le matériau le plus sensible à cet acide. On sait que le plomb non terni risque moins de se corroder si la concentration d'acide acétique est inférieure à 400 µg/m³. Le plomb terni ne se corrodera pas si la concentration d'acide acétique est inférieure à 3 000 µg/m³ (Tétreault et coll., 1998), à moins que la patine ou la couche de ternissure ne soit pas uniforme ou

stable. Dans ce cas, il peut y avoir de la corrosion. La concentration d'acide acétique émise par le chêne rouge non verni peut atteindre $6\ 700\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans un contenant de protection étanche (Tétreault et Stamatopoulou, 1997). Le risque de corrosion du plomb est donc évident en présence de chêne, ce qui met en lumière la problématique de l'étanchéité des contenants de protection lorsque la source de polluants se trouve à l'intérieur.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 128118-0002

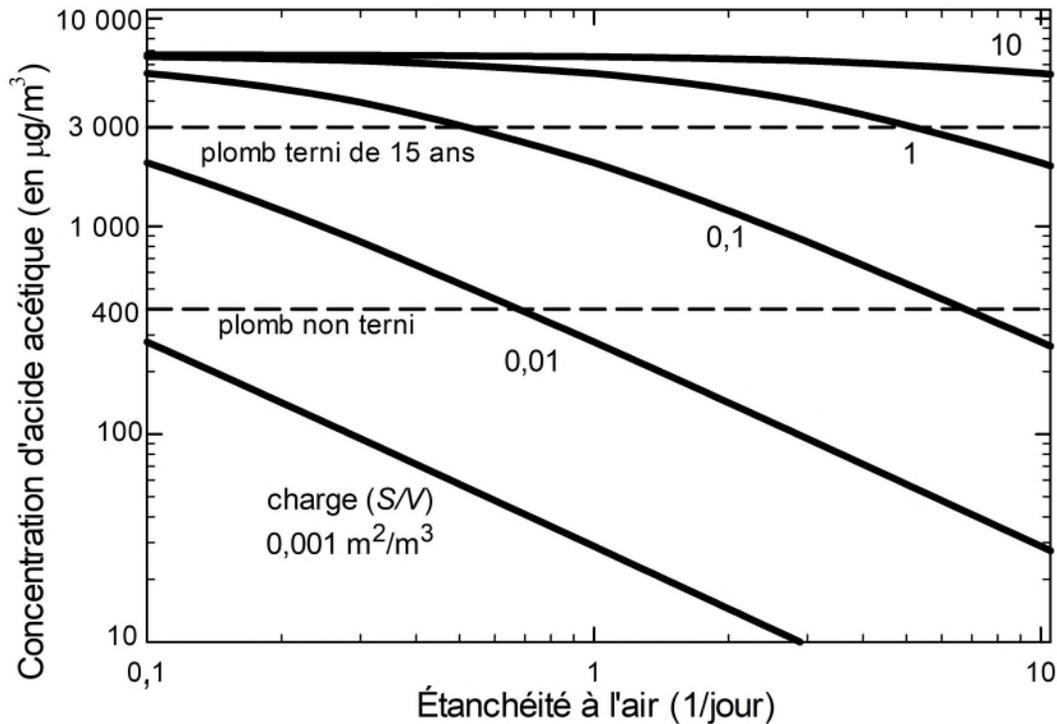
Figure 17. Article en plomb plaqué de laiton corrodé dans une vitrine en chêne verni. Noter les dépôts de poussière blanche; on suppose qu'il s'agit de composés de corrosion du plomb.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 130062-0060

Figure 18. Barre de plomb montée sur un socle en bois verni à l'intérieur d'une vitrine d'exposition. La barre de plomb se corrodé, très probablement à cause des composés volatils acides qu'émettent le bois et le vernis.

Le risque de corrosion du plomb en présence de chêne peut être évalué à l'aide de l'équation 3. On peut établir la concentration d'acide acétique dans la vitrine en fonction de l'étanchéité à l'air et de différentes charges (rapport entre la surface émissive et le volume de la vitrine), comme le montre la figure 19. Un coefficient de transfert de masse de 0,18 m/h pour le système acide acétique-chêne est choisi en s'appuyant sur les travaux de Ryhl-Svendsen et Glastrup (2002) ainsi que de Smedemark et coll. (2020).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0028

Figure 19. Concentration de l'acide acétique émis par le chêne dans un contenant de protection en fonction de l'étanchéité à l'air et de différentes charges.

Si l'on suppose un volume de 1 m^3 , chaque charge sur la figure représente la surface d'un panneau de chêne :

- $10 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 10$ panneaux de 1 m^2
- $1 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 1$ panneau de 1 m^2
- $0,1 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 1$ panneau de 32 cm sur 32 cm
- $0,01 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 1$ panneau de 10 cm sur 10 cm
- $0,001 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 1$ panneau de 3,2 cm sur 3,2 cm

Deux concentrations de référence sont indiquées sur la figure : l'une à 400 et la seconde à $3\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces deux concentrations représentent la limite de concentration nécessaire pour prévenir la corrosion du plomb terni et du plomb non terni, respectivement.

À la figure 19, on peut constater qu'un petit morceau de chêne sans revêtement de 3,2 cm sur 3,2 cm a peu de chances de provoquer de la corrosion, quelle que soit l'étanchéité à l'air du contenant de protection. Un morceau de chêne de 10 cm sur 10 cm peut déjà constituer un problème potentiel pour le plomb non terni s'il est dans un contenant de protection ayant une étanchéité à l'air inférieure à 0,7/jour. Le plomb terni stable risque de se corroder en présence d'un morceau de 32 cm sur 32 cm à une étanchéité à l'air inférieure à 0,5/jour. Le chêne avec revêtement demeure néanmoins un risque pour le plomb dans de nombreuses circonstances.

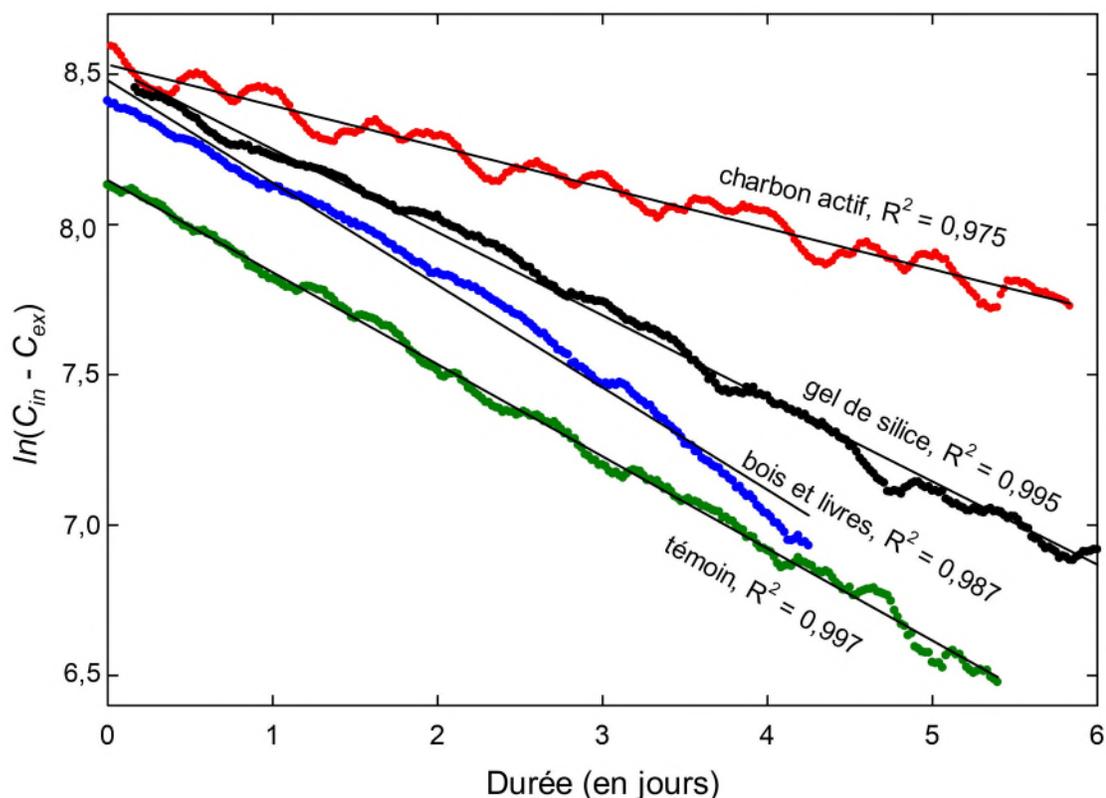
Souvent, le bois entrant dans la fabrication d'une vitrine est peint. Les revêtements en émulsion sèche peuvent facilement réduire le taux d'émission d'acide acétique du chêne de 90 % ou plus (Tétreault et Stamatopoulou, 1997). Si l'on suppose une réduction de 90 % dans ce scénario, alors le coefficient de transfert de masse du panneau de chêne avec revêtement sera de 0,018 m/h (10 fois plus petit que celui du chêne sans revêtement). La figure 19 peut être utilisée avec le chêne avec revêtement, mais la charge doit être considérée comme 10 fois plus faible. Par exemple, le niveau d'acide acétique est de 2 021 ppb avec une charge de chêne = $0,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ et une $N = 1/\text{jour}$. Pour le chêne avec revêtement avec une charge ajustée ($0,01 \text{ m}^2/\text{m}^3$), le niveau d'acide acétique n'atteint que 277 ppb. Il convient de noter que certaines peintures à l'huile peuvent libérer beaucoup plus d'acide que le chêne lui-même.

L'utilisation de l'équation 3 présente certaines limites. Le coefficient de transfert de masse peut varier si les conditions d'utilisation (étanchéité à l'air, taux d'émission, surface et volume) diffèrent des conditions expérimentales. L'équation suppose également qu'il n'y a pas de sorption de produit à l'intérieur de la vitrine ni de polluant extérieur.

Il est évident, sur la figure 18, que la barre de zinc en arrière-plan est montée de manière similaire et exposée aux mêmes composés volatils à l'intérieur de la vitrine, mais qu'elle ne présente pas de signes évidents de corrosion. Le zinc est beaucoup plus résistant à l'action corrosive de l'acide acétique (Tétreault, 2003, p. 26).

Étude de cas 3 : l'effet de la température sur la teneur en CO₂ à l'équilibre

Les fluctuations de température peuvent avoir une incidence sur la valeur d'étanchéité à l'air en provoquant des écarts de pression entre le contenant de protection et la pièce, et elles peuvent avoir une influence supplémentaire en modifiant la teneur en CO₂ à l'équilibre de divers matériaux. La concentration à l'équilibre entre le CO₂ dans l'air et un matériau solide est similaire au concept d'équilibre hygrométrique, bien connu des restaurateurs. Pour une température et une concentration de CO₂ dans l'air en particulier, les matériaux peuvent avoir une teneur en CO₂ différente. Lorsque la concentration de CO₂ diminue, le CO₂ absorbé se désorbe lentement. Ce processus d'absorption et de désorption peut avoir une incidence sur la mesure de l'étanchéité à l'air. Le béton est un matériau ayant une grande capacité d'absorption du CO₂. Il absorbe le CO₂ dans une mesure dix fois plus grande que le bois et les livres (Kigawa et coll., 2003). Le charbon actif est également un bon absorbeur de CO₂, tandis que le gel de silice a la moitié de sa capacité (Berlier et Frère, 1997).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0030

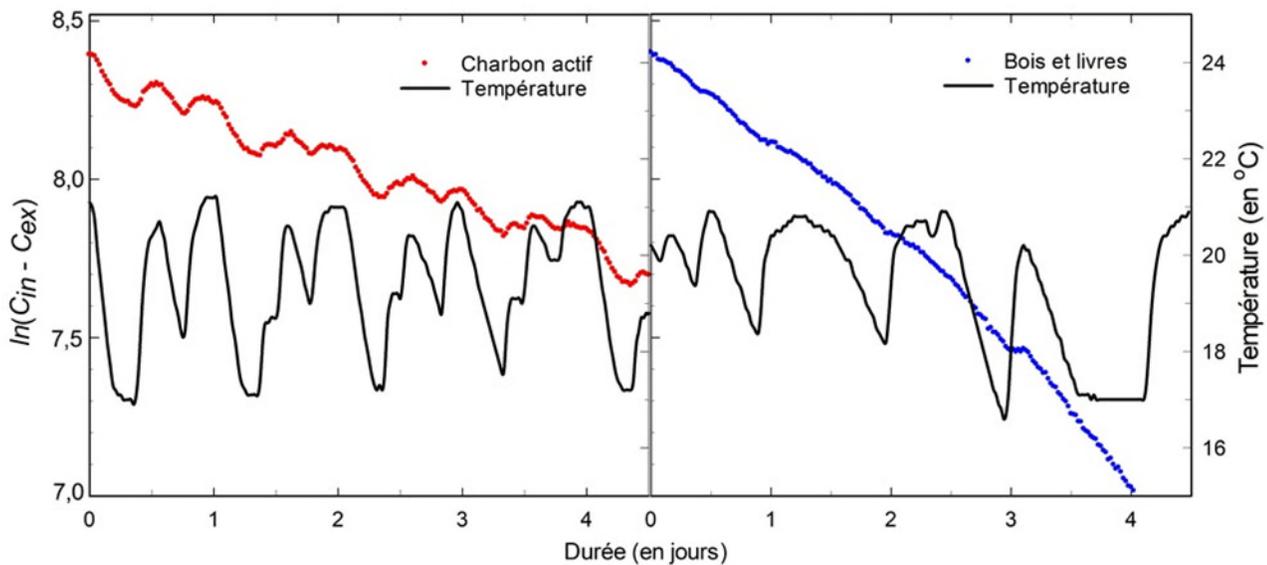
Figure 20. Logarithme naturel de la diminution de la concentration de CO₂ dans un contenant en plastique renfermant différents matériaux, dans une plage de fluctuation de température allant de 17,0 °C à 21,0 °C. Certaines pentes ont été décalées pour qu'il soit plus facile de distinguer la fluctuation causée par chaque matériau.

La figure 20 montre le logarithme naturel de la diminution de la concentration de CO₂ dans un contenant en plastique de 0,063 m³ renfermant différents éléments. Trois matériaux ont été utilisés pour réaliser des expériences distinctes : 0,380 kg de charbon actif (fabriqué à partir de coquilles de noix de coco), 0,66 kg de gel de silice (une cassette de PROSorb) et un mélange de 1,49 kg de planches de pin et de 1,87 kg de livres. Le témoin était simplement un contenant vide. Pendant les essais, les fluctuations quotidiennes de température ont été maintenues dans une plage de 17,0 °C à 21,0 °C. D'après les mesures, il est évident que les pentes du contenant de protection comprenant du gel de silice et de celui renfermant du bois et des livres sont similaires à celle du témoin. Thickett (2012, p. 106-107) n'a également constaté aucune différence dans la valeur d'étanchéité à l'air avec le gel de silice. Le résultat avec le charbon actif est différent à double titre, car il présente la pente la plus faible (meilleure étanchéité à l'air implicite) et la diminution de la concentration la moins stable (R^2 le plus faible).

Le comportement de la vitrine contenant du charbon actif est intéressant d'un point de vue théorique. Le charbon actif a une grande surface, ce qui augmente sa capacité de sorption et permet un taux élevé

d'adsorption et de désorption des gaz. Étant donné cette grande surface, le gaz atteint plus rapidement un nouvel équilibre lorsque la température ou la concentration de gaz dans l'air change. Dans un essai de diminution de la concentration de CO₂, le gaz se répand dans le contenant de protection après son injection, et une partie du CO₂ est adsorbée par les matériaux selon leurs capacités respectives. À mesure que la concentration de CO₂ diminue par fuite du contenant de protection, le gaz adsorbé dans les matériaux est libéré lentement, ce qui ralentit la diminution de la concentration et sous-entend à tort une meilleure étanchéité à l'air.

Comme mentionné précédemment, l'expérience avec le charbon actif montre la plus grande fluctuation journalière. Cette variabilité de la pente est bien synchronisée avec la fluctuation de la température, comme le montre la figure 21 (à gauche). Sur la même figure (à droite), la vitrine contenant du bois et des livres montre une incidence minimale sur les changements de température quotidiens. On remarque également une déviation régulière à long terme de la pente, qui est plus évidente sur la figure 20.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0032

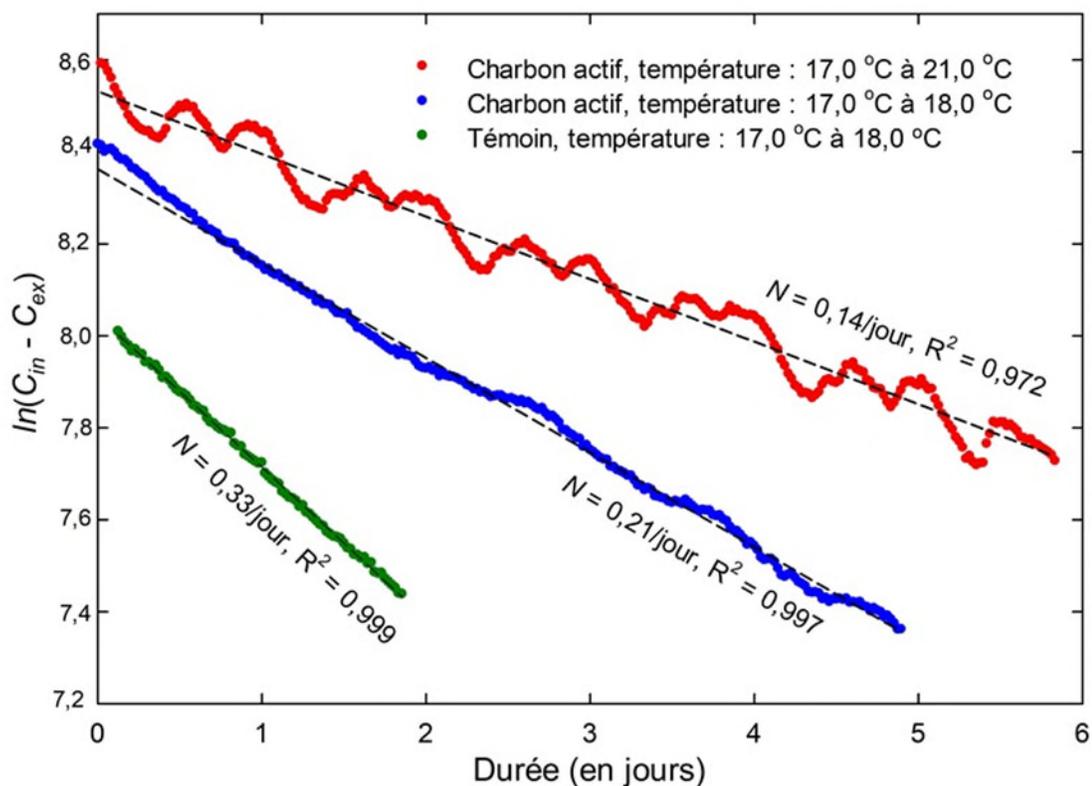
Figure 21. Logarithme naturel de la diminution de la concentration de CO₂ dans un contenant en plastique renfermant du charbon actif (à gauche) et du bois et des livres (à droite), dans une plage de fluctuation de température allant de 17,0 °C à 21,0 °C.

Si l'on reproduit l'essai de diminution de la concentration de CO₂ avec les mêmes matériaux sous une température stable (17,0 °C à 18,0 °C), on améliore le R² pour toutes les pentes, comme le montre le tableau 3. L'étanchéité à l'air implicite de la vitrine contenant du charbon actif était encore meilleure que celle du contenant témoin, mais pas dans la même mesure qu'avec des fluctuations de température plus importantes (ce qui est illustré à la figure 22). Les taux d'échange d'air en cas de fluctuations de température faibles et élevées sont respectivement inférieurs de 59 % et de 38 % à celui du contenant témoin. Cette mauvaise détermination de l'étanchéité à l'air due au charbon actif est indépendante de la période de stabilisation. C'est pourquoi il est

recommandé de mesurer la diminution de la concentration de CO₂ avec un contenant de protection vide ou, à tout le moins, sans charbon actif.

Tableau 3 : Étanchéité à l'air d'un contenant en plastique renfermant différents matériaux selon des fluctuations de température élevées et faibles

Matériaux dans le contenant	Étanchéité à l'air (1/jour) du contenant soumis à des variations de température élevées de 17,0 °C à 21,0 °C	Étanchéité à l'air (1/jour) du contenant soumis à de faibles variations de température de 17,0 °C à 18,0 °C
Charbon actif	0,14, R ² = 0,9720	0,21, R ² = 0,997
Gel de silice	0,28, R ² = 0,9948	0,28, R ² = 0,997
Bois et livres	0,34, R ² = 0,9870	0,30, R ² = 0,999
Aucun (témoin)	0,31, R ² = 0,9974	0,33, R ² = 0,999



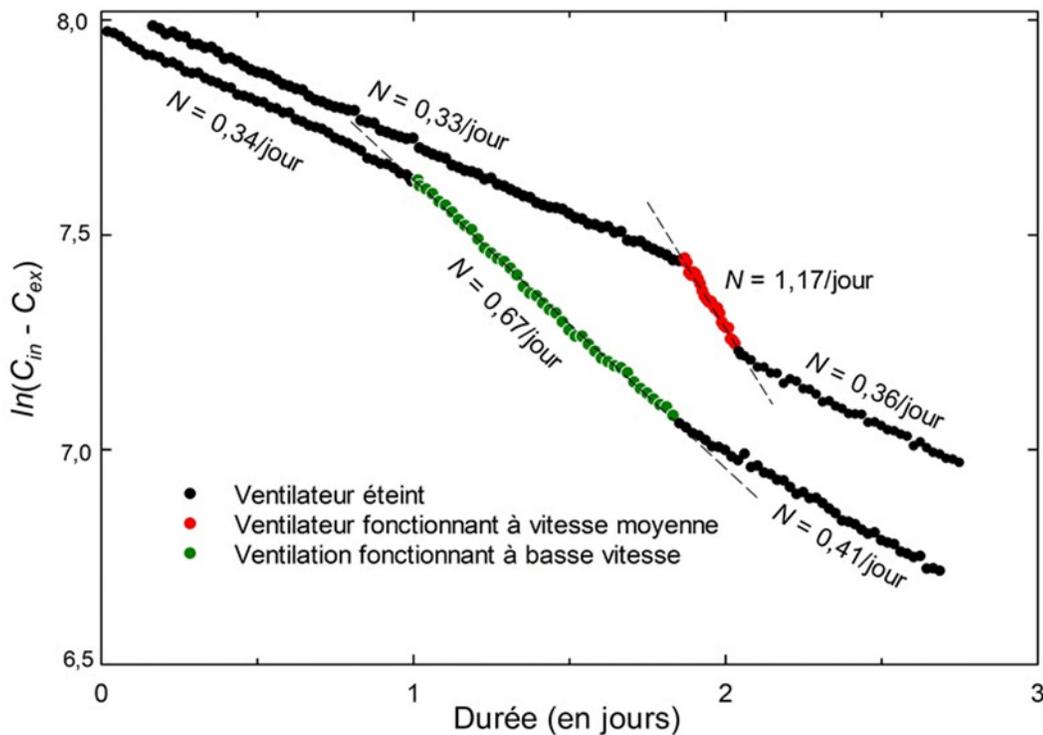
© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0034

Figure 22. Logarithme naturel de la diminution de la concentration de CO₂ dans un contenant en plastique renfermant du charbon actif selon des fluctuations de température élevées et faibles, comparé avec celui du contenant témoin.

Étude de cas 4 : l'effet d'un ventilateur

L'utilisation d'un ventilateur à l'intérieur d'un contenant de protection peut sembler être une bonne solution pour accélérer le mélange de l'air et raccourcir la période de stabilisation, mais il est important de prendre en compte les autres effets de la circulation de l'air. Pour vérifier les effets potentiels d'un ventilateur sur les mesures d'étanchéité à l'air, deux essais ont été effectués avec un ventilateur à courant continu (12 volts, 0,24 ampère) installé dans un contenant en plastique de 0,063 m³. Lors du premier essai, le ventilateur fonctionnait à 1,5 volt (basse vitesse) et lors du second essai, à 4,5 volts (vitesse moyenne). Un haut cylindre de verre de 12 cm de diamètre a été placé au centre du contenant dans l'espoir de créer un flux circulaire. Le ventilateur a été mis en marche pendant un temps limité, bien après la fin de la période de stabilisation.

La figure 23 montre deux diminutions de la concentration logarithmique naturelle dont la pente augmente lorsque le ventilateur est mis en marche, surtout à une vitesse moyenne. Cela montre clairement l'effet du ventilateur sur l'étanchéité à l'air pour une vitrine d'exposition de petit volume. En pratique, un ventilateur fonctionnant à basse vitesse peut ne pas interférer de manière significative avec la mesure de l'étanchéité à l'air de grandes vitrines d'exposition. Par précaution, l'utilisation d'un ventilateur devrait être limitée aux cinq à dix premières minutes afin de réduire la période de stabilisation.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0036

Figure 23. Effet sur l'étanchéité à l'air d'un contenant en plastique de 0,063 m³ lorsqu'un ventilateur est activé à une vitesse moyenne par rapport à une basse vitesse. Lors de l'expérience, les vitesses du ventilateur ont été activées au milieu du processus de diminution de la concentration.

Étude de cas 5 : justification de la durée de l'essai

Sous [Durée de l'essai de diminution de la concentration](#), deux durées ont été proposées : moins d'un jour, par exemple de 7 à 16 heures pour les résultats préliminaires ou un contrôle de fabrication, et quatre jours pour la certification. L'élimination complète du CO₂ excédentaire dans un contenant de protection peut prendre beaucoup plus de temps. Pour une vitrine très étanche à l'air, il peut falloir plus de 10 jours pour atteindre la concentration moyenne de CO₂ dans la pièce. Heureusement, il n'est pas nécessaire que la concentration de CO₂ atteigne le niveau de fond (pièce) pour que l'essai soit valide. La durée de l'essai peut être bien plus courte si l'on enregistre avec précision une quantité suffisante de données. Tout dépend des facteurs suivants :

- le niveau initial et le niveau final de CO₂;
- la période de stabilisation du niveau de CO₂ dans la vitrine d'exposition;
- le changement critique de la diminution de la concentration;
- la quantité minimale de données enregistrées;
- l'étanchéité à l'air prévue.

Comme indiqué précédemment, le niveau initial de CO₂ devrait se situer dans une plage de 3 000 ppm à 6 000 ppm. Il existe également une limite pratique à la fin de l'essai. La concentration de CO₂ ne devrait pas être inférieure à 600 ppm environ au-dessus du niveau de fond moyen. Par exemple, si un niveau de 550 ppm est mesuré dans la pièce, la limite finale est de 1 150 ppm (550 + 600). Si l'on ajoute moins de 600 ppm au niveau de fond, les niveaux de CO₂ dans la vitrine sont plus facilement affectés par les fluctuations du niveau de CO₂ dans la pièce. Pour cette raison, les données enregistrées en dessous de cette limite finale ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de l'étanchéité à l'air. Il est préférable de commencer par une concentration de CO₂ proche de 6 000 ppm lorsque le niveau de fond dans la pièce est bien supérieur à 1 000 ppm. Cela permet de s'assurer que la durée de l'essai est adéquate.

La stabilisation ou l'homogénéisation de la concentration du gaz dépend de la taille et de la conception de la vitrine d'exposition. Certains objets ou matériaux constitutifs du contenant de protection peuvent absorber le CO₂ et le libérer ultérieurement. Les vitrines d'exposition peuvent contenir deux compartiments ou plus, comme une section pour le contrôle de l'environnement, un support d'exposition vide ou des objets emballés dans des sacs en plastique hermétiques, qui peuvent prendre du temps avant d'atteindre un niveau de CO₂ uniforme. Cette stabilisation peut prendre de quelques minutes à plusieurs heures. Thickett (2012, p. 103) a indiqué qu'elle pouvait prendre jusqu'à 14 heures selon la complexité de la structure de la vitrine. Sous [Étude de cas 6 : vitrine d'exposition à compartiments multiples](#) se trouve un exemple où la stabilisation d'une vitrine à deux compartiments se produit seulement après 38 heures. Les données enregistrées pendant la période de stabilisation ne sont pas prises en compte dans la détermination de l'étanchéité à l'air. La concentration de CO₂ atteinte après la période de stabilisation devient le niveau de départ de la concentration de CO₂.

Il y a une condition importante à remplir pour pouvoir déterminer l'étanchéité à l'air, à savoir qu'il faut observer une diminution significative de la concentration de CO₂ après une période prédéterminée. Cette condition pourrait constituer une difficulté pour les contenants de protection très étanches à l'air. Une diminution significative de la concentration peut être définie comme une perte de 20 % du niveau initial de CO₂. Cette diminution de la concentration de 20 % est fondée sur la question de la reproductibilité de la

technique (consulter [Étude de cas 7 : erreur et reproductibilité](#)). Par exemple, si la concentration de départ de CO₂ est de 5 000 ppm (après la période de stabilisation), une perte de 20 % correspond à une concentration de 4 000 ppm [5 000 × (1,00 – 0,20)]. Si la diminution significative de la concentration de 20 % n'est pas atteinte au cours de l'expérience, on pourrait considérer que l'étanchéité à l'air est acceptable, bien qu'il soit impossible de la mesurer avec précision.

Outre l'obtention d'une diminution de la concentration minimale de 20 % par rapport à la concentration de départ, il est recommandé de disposer d'un minimum de 20 points de données uniformément répartis pour générer une tendance valable. La qualité (linéarité) de la courbe de tendance est évaluée sur un graphique logarithmique semi-naturel au moyen d'un R² supérieur à 0,990. Après la période de stabilisation, 10 heures d'enregistrement de données sont nécessaires si l'enregistreur de données de surveillance est paramétré pour prendre des mesures toutes les 30 minutes (il faut 20 heures de données si des mesures sont prises toutes les heures). Ces 20 mesures de données font également en sorte que l'on peut avoir une grande confiance en la qualité du résultat pour la certification.

De nombreuses personnes s'attendent à observer une diminution de la concentration prolongée, et pas seulement une perte de 20 % de CO₂. Si le temps le permet, l'étape suivante consiste à laisser l'essai se dérouler jusqu'à ce que la diminution de la concentration atteigne sa demi-vie (demi-décroissance). Il s'agit d'un concept fréquemment utilisé lors des processus où la diminution de la concentration est exponentielle. Si la concentration de départ du CO₂ est de 5 000 ppm et que le niveau de fond est de 500 ppm, la demi-décroissance se situe à une concentration de 2 250 ppm [(5 000 – 500)/2]. Bien entendu, l'étape finale, si l'on dispose de plus de temps, est le moment où la diminution de la concentration atteint la concentration limite finale de CO₂ (500 ppm + 600 ppm) décrite précédemment.

Si la vitrine d'exposition testée est censée répondre à certaines exigences, comme une étanchéité à l'air inférieure à 0,3/jour, la durée de l'essai peut être planifiée en conséquence. L'équation 5 aide à définir les conditions expérimentales et à prédire la durée de l'essai.

Équation 5 :

$$t = \ln \frac{C_{in1} - C_{ex}}{C_{in2} - C_{ex}} \times N$$

Où

t = durée de l'essai pour une concentration cible en particulier (en jours)

C_{in1} = concentration de départ après la stabilisation (en ppm)

C_{ex} = concentration de fond (en ppm)

C_{in2} = concentration ciblée (en ppm) telle que la diminution de la concentration de 20 %, la demi-décroissance ou le niveau final ($C_{ex} + 600$ ppm)

$N = \text{étanchéité à l'air (1/jour)}$

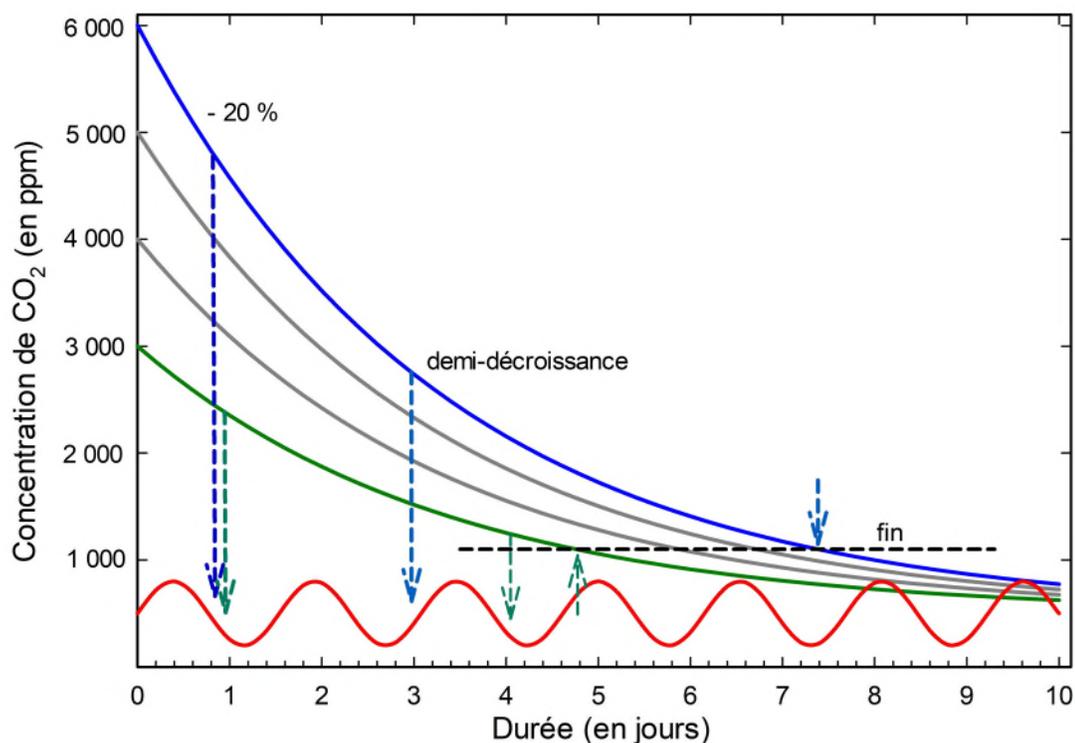
L'équation suppose que le temps à C_{in1} est 0 jour.

Trois scénarios sont proposés ci-dessous en fonction d'une concentration de départ de CO₂ de 5 000 ppm, d'un niveau de fond de CO₂ de 500 ppm et d'une étanchéité à l'air souhaitée fixée à 0,30/jour.

- Temps pour atteindre 20 % de diminution de la concentration :
 $t = \{ \ln(5\,000 - 500) - \ln[5\,000 \times (1 - 0,20) - 500] \} / 0,30 = 0,84 \text{ jour}$
- Temps pour atteindre la demi-décroissance :
 $t = (\ln(5\,000 - 500) - \ln\{[(5\,000 - 500) / 2] - 500\}) / 0,30 = 3,1 \text{ jours}$
- Temps pour atteindre la limite finale
($C_{ex} + 600 \text{ ppm}$) : $t = \{ \ln(5\,000 - 500) - \ln[(500 + 600) - 500] \} / 0,30 = 6,7 \text{ jours.}$

Une période de quatre jours devrait suffire à ajuster le niveau initial de CO₂, à le stabiliser et à atteindre la demi-décroissance. C'est la raison pour laquelle la certification est fondée sur une durée de quatre jours. Cette période de quatre jours exclut tout moment où le niveau de CO₂ est en dehors de la plage de détection. Une période de quatre jours permet de recueillir suffisamment de données pour sélectionner un segment offrant un R² élevé (par exemple, si un changement inattendu se produit en raison de conditions environnementales changeantes, d'un changement du niveau de fond de CO₂ ou d'une défaillance des joints d'étanchéité du contenant).

La figure 24 montre les jalons de la décroissance pour un niveau de CO₂ de départ compris entre 3 000 ppm et 6 000 ppm, selon l'équation 5. La limite finale a été fixée à 1 100 ppm pour éviter l'influence du niveau de fond fluctuant fixé à 500 ppm ± 300 ppm.

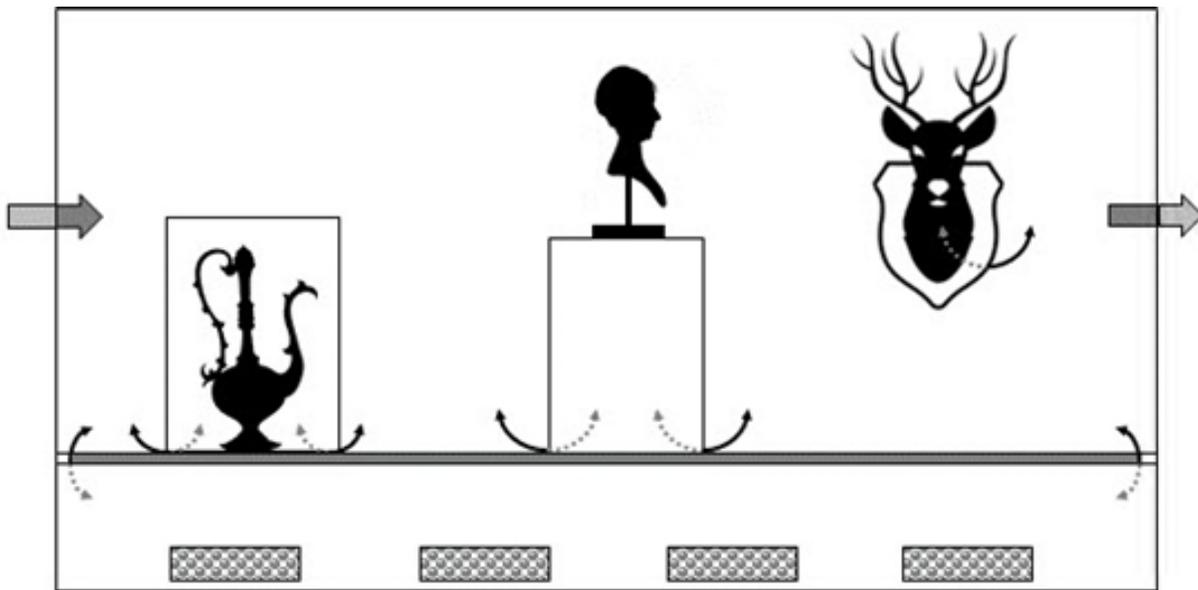


© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0038

Figure 24. Diminution de la concentration de CO₂ dans un contenant de protection ayant une étanchéité à l'air de 0,30/jour, à partir de niveaux de concentration différents. La figure montre le temps nécessaire pour atteindre une perte de 20 %, la demi-décroissance et la limite finale pratique. La fluctuation quotidienne du niveau de CO₂ à l'extérieur du contenant de protection est indiquée en rouge.

Étude de cas 6 : vitrine d'exposition à compartiments multiples

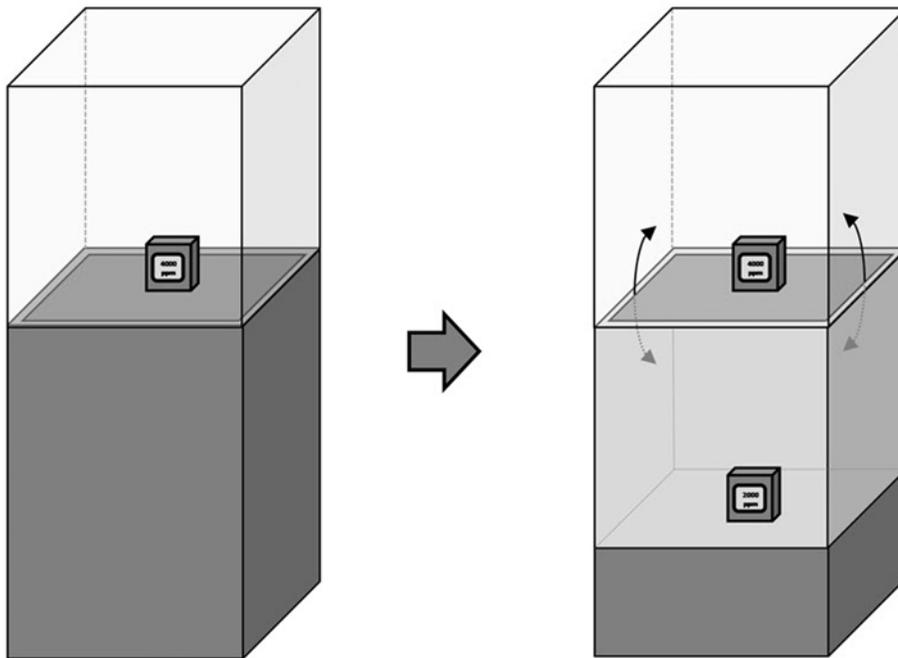
Les contenants de protection comportent souvent plusieurs compartiments interconnectés. Par exemple, une vitrine d'exposition peut comporter deux compartiments, l'objet exposé étant placé dans la partie supérieure et les matériaux pour le contrôle de l'environnement, pour leur part, étant placés dans la partie inférieure, à l'abri des regards. Les vitrines d'exposition peuvent également comprendre des espaces intérieurs qui jouent le rôle d'un boîtier dans un boîtier. Ces espaces intérieurs peuvent consister en un objet fragile encapsulé dans son contenant spécial, en un support vide utilisé pour surélever un petit objet ou même en un objet comprenant un vide interne, comme le montre la figure 25. Un boîtier dans un boîtier apporte une stabilité supplémentaire à l'environnement intérieur du contenant de protection, notamment en ce qui concerne les fluctuations de l'HR. L'inconvénient est que la multiplicité des contenants de protection peut entraîner une longue période de stabilisation, puisque le CO₂ doit être à l'équilibre dans tous les sous-espaces.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0039

Figure 25. Exemple de vitrine d'exposition montrant les volumes internes de gauche à droite : un objet encapsulé, un support pour surélever un petit objet et un objet comprenant un vide interne. Un compartiment dans la partie inférieure de la vitrine, où l'on peut insérer des sorbants d'humidité et de polluants, sert au contrôle de l'environnement. Les petites flèches montrent le lent mouvement de l'air entre le contenant de protection principal et les contenants de protection internes plus petits.

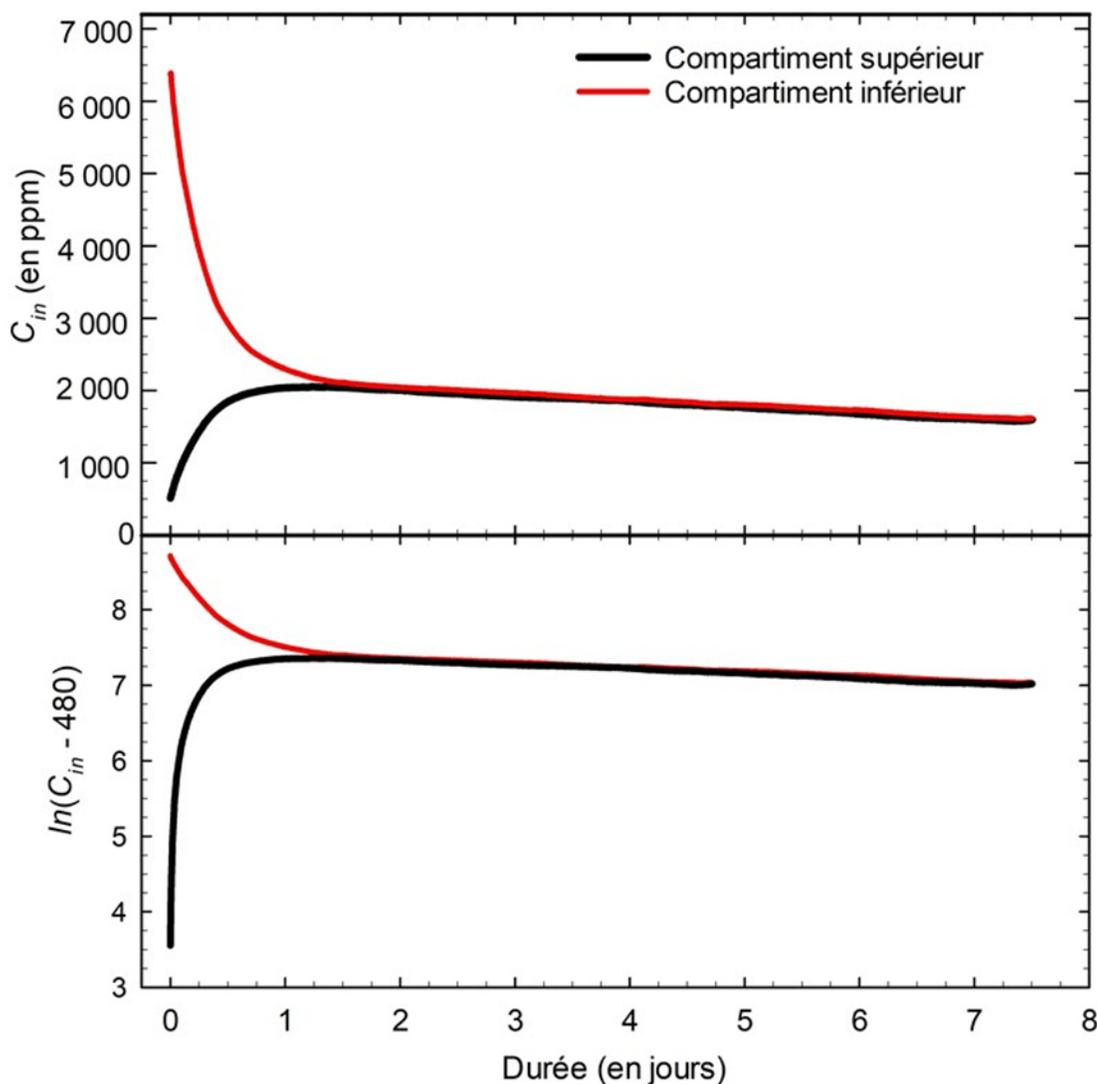
Une vitrine d'exposition vide à deux compartiments a été étudiée pour démontrer l'effet des compartiments multiples sur la période de stabilisation. La vitrine était faite de plastique acrylique (connu sous le nom de marque Plexiglas) et de bois (figure 26), et elle avait un volume total de $0,53 \text{ m}^3$. Le compartiment supérieur avait un volume de $0,27 \text{ m}^3$ et la base, de $0,25 \text{ m}^3$. L'interface entre les deux compartiments devait permettre une circulation de l'air suffisante. Un niveau de CO_2 de 480 ppm a été mesuré comme niveau de fond dans la pièce, et deux enregistreurs de données de surveillance du CO_2 ont été installés dans les parties supérieure et inférieure de la vitrine, respectivement. Le gaz traceur de CO_2 a été injecté dans la partie inférieure.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0040

Figure 26. Vitrine d'exposition à deux compartiments. Comme le montre la vitrine de droite, la partie supérieure est la zone d'exposition, et la partie inférieure peut contenir du gel de silice pour contrôler l'HR dans l'ensemble de la vitrine. Deux petites flèches montrent le lent mouvement de l'air entre les deux parties.

La figure 27 montre l'évolution du CO₂ dans les deux compartiments de la vitrine d'exposition sous forme de lecture directe du CO₂ et de valeur logarithmique naturelle. Les deux graphiques montrent, initialement, un niveau élevé de CO₂ dans la partie inférieure de la vitrine, où le CO₂ a été injecté, et un niveau faible dans la partie supérieure. Avec le temps, les niveaux convergent vers une valeur commune et atteignent le même taux de diminution de la concentration après 38 heures. L'étanchéité à l'air de l'ensemble de la vitrine était de 0,06/jour avec un $R^2 = 0,995$; ce résultat a été obtenu en utilisant la méthode de diminution de la concentration en plusieurs points pour la période de 38 heures à 4 jours.



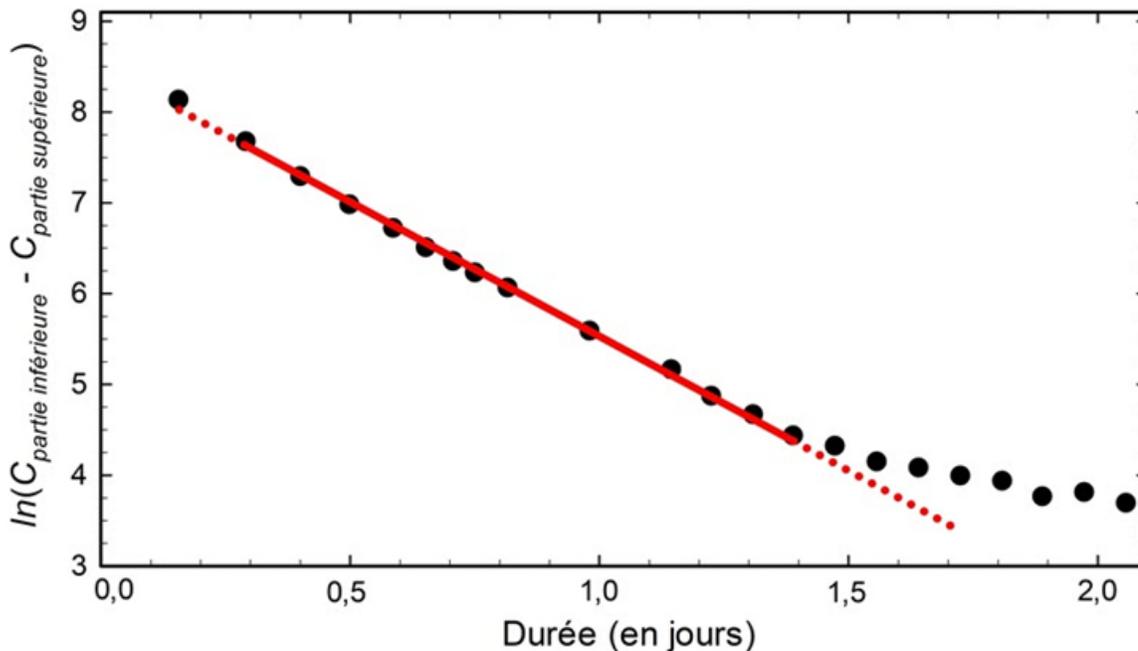
© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0042

Figure 27. Évolution des niveaux de CO₂ dans les deux compartiments de la vitrine d'exposition, représentée par une lecture directe du niveau de CO₂ en ppm (en haut) et une valeur logarithmique naturelle (en bas).

Avec une vitrine d'exposition ainsi conçue, il est facile de commettre une erreur fondamentale lors de la détermination de l'étanchéité à l'air si l'on utilise la méthode de diminution de la concentration en deux points sans évaluer la diminution de la concentration sur une période prolongée. On obtient une étanchéité à l'air de 1,06/jour en utilisant les deux points à deux heures (attente erronée de stabilisation) et à un jour pour une évaluation à court terme. La méthode de diminution de la concentration en deux points donne une étanchéité à l'air de 0,32/jour si l'essai dure quatre jours au lieu d'un. Évidemment, si la période de stabilisation n'est pas prise en compte, cela peut entraîner une erreur importante dans la valeur de l'étanchéité à l'air. Il est également

peu probable qu'un ventilateur soit en mesure de stabiliser la concentration de CO₂ dans les deux compartiments.

Le taux d'échange d'air entre les parties supérieure et inférieure de la vitrine d'exposition peut être déterminé à l'aide de deux appareils de mesure du CO₂. En supposant que le taux d'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur est beaucoup plus petit que le taux d'échange d'air entre les parties supérieure et inférieure, on calcule le taux d'échange d'air entre ces dernières en remplaçant $\ln(C_{in} - C_{ex})$ par $\ln(C_{partie\ inférieure} - C_{partie\ supérieure})$. Le taux d'échange d'air entre les compartiments est de 2,90/jour avec un $R^2 = 0,999$ pour la plage linéaire de 0,3 à 1,3 jour, comme le montre la figure 28.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0044

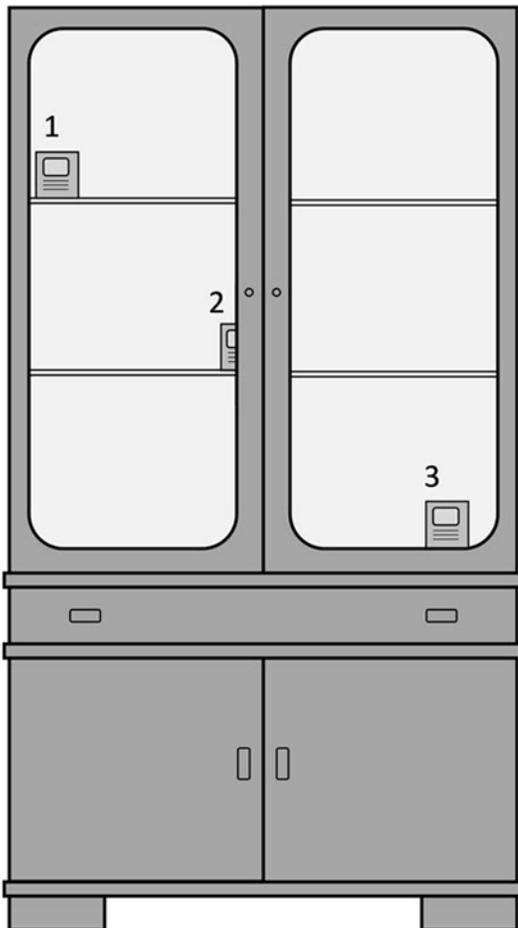
Figure 28. Logarithme naturel de la différence de concentration en CO₂ entre les deux parties de la vitrine d'exposition.

Comme cette vitrine d'exposition est bien protégée contre les agents extérieurs avec une étanchéité à l'air de 0,06/jour, le mouvement d'air de 2,90/jour entre le compartiment de contrôle de l'environnement et la zone d'exposition est suffisant. Cependant, il n'est pas possible de déterminer à partir de ces résultats si la fuite principale provient de la partie supérieure ou de la partie inférieure de la vitrine d'exposition.

Étude de cas 7 : erreur et reproductibilité

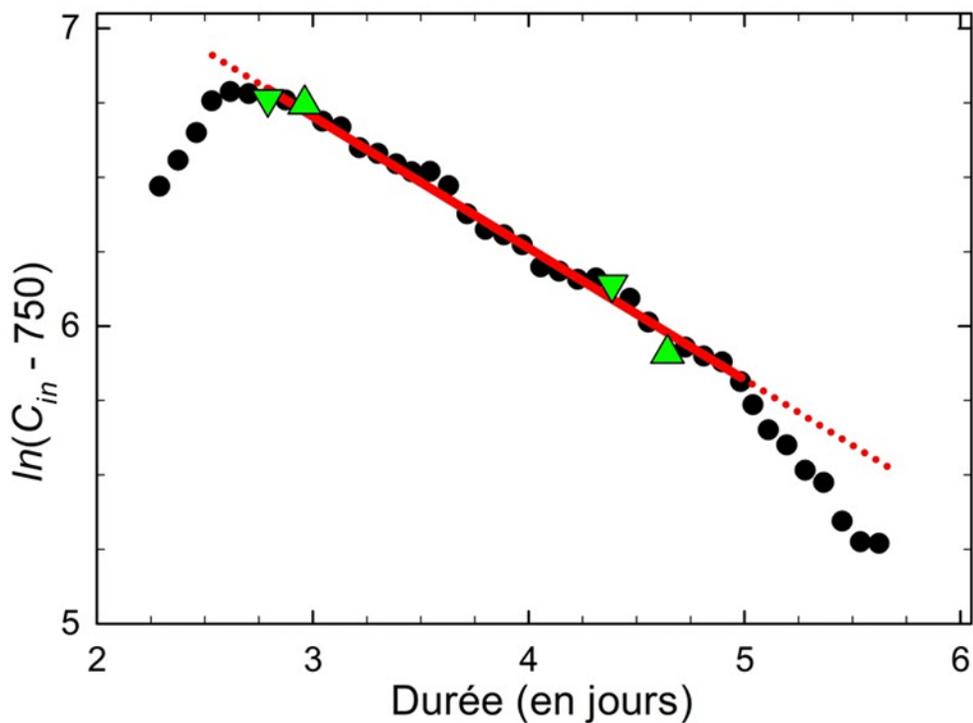
Toute technique d'analyse présente des incertitudes en raison des erreurs possibles de l'utilisateur, de la précision et de la stabilité de l'instrument ainsi que de la variabilité du sujet mesuré. Cette étude de cas explore ces questions en utilisant un vaisselier à manger comme contenant de protection. Un vaisselier de 0,2 m³ a été

récemment amélioré de sorte à être plus hermétique pour la détermination de l'étanchéité à l'air. Dans un premier temps, un seul moniteur de CO₂ a été placé au milieu (figure 29). La méthode de diminution de la concentration en plusieurs points a permis d'obtenir une étanchéité à l'air de 0,44/jour avec un R² = 0,991. La valeur d'étanchéité à l'air peut varier de manière significative avec la méthode de diminution de la concentration en deux points, en fonction des points de données sélectionnés, et ce, même dans la plage linéaire. Dans les scénarios extrêmes, l'étanchéité à l'air peut être supérieure de 16 % (points en triangle inversé) ou inférieure de 13 % (points en triangle), comme le montre la figure 30.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0045

Figure 29. Schéma d'un vaisselier ancien en bois contenant trois appareils de mesure du CO₂ répartis uniformément. Seule la partie supérieure a fait l'objet d'une surveillance, car les armoires et tiroirs inférieurs n'y étaient pas reliés.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132731-0047

Figure 30. Graphique représentant la diminution de la concentration de CO₂ dans le vaisselier. La ligne rouge représente la tendance pour la méthode de diminution de la concentration en plusieurs points. Pour la méthode en deux points, les paires de triangles indiquent les valeurs extrêmes : triangles à l'endroit pour la pente la plus élevée et triangles à l'envers pour la pente la plus faible. Le niveau de fond de CO₂ est de 750 ppm.

Dans le cadre d'une étude complémentaire réalisée avec le même vaisselier, trois appareils de mesure du CO₂ ont été installés, et le vaisselier a été testé trois fois. Chaque fois, le vaisselier a été ouvert pour l'injection de CO₂, puis scellé de nouveau. Les trois appareils de mesure ont été installés à différents endroits, comme le montre la figure 29. Les résultats obtenus avec la méthode en plusieurs points sont présentés dans le tableau 4. Le premier essai avec les trois appareils de mesure a donné une étanchéité à l'air de 0,44/jour avec un écart type de 0,03/jour ou un écart type relatif de 7,4 %. Les deuxième et troisième essais ont donné une étanchéité à l'air de 0,52/jour et de 0,38/jour avec des écarts types relatifs de 5,2 % et de 3,9 %, respectivement. La moyenne de l'étanchéité à l'air, si l'on tient compte des trois essais, est de 0,44/jour avec un écart type relatif de 14 %.

Tableau 4 : Essais d'étanchéité à l'air sur un vaisselier en bois (1/jour)

Appareil de mesure	Essai 1	Essai 1	Essai 3
Appareil de mesure 1	0,426	0,517	0,360
Appareil de mesure 2	0,415	0,488	0,386
Appareil de mesure 3	0,476	0,541	0,385
Moyenne	0,44	0,52	0,38
Écart type	0,03	0,03	0,02
Écart type relatif (%)	7,4	5,2	3,9

Remerciements

Les auteurs du présent document souhaitent remercier Jennifer Herrmann de la National Archives and Record Administration des États-Unis, Eric Breitung et Alayna Bone du Metropolitan Museum of Art et David Thickett d'English Heritage pour leurs commentaires durant le processus de révision. Les auteurs sont également reconnaissants pour les réponses fournies par diverses personnes dans le cadre d'une consultation organisée sur le Global Conservation Forum.

Annexe A : Liste de contrôle de l'étanchéité à l'air

Vérifier d'abord s'il y a des fuites générales qu'il est possible de réparer sans recourir à des instruments spécialisés.

- Vérifier qu'il n'y a pas de points de fuite majeurs visibles en examinant :
 - les interfaces entre les surfaces assemblées, tels les panneaux acryliques, en verre ou en plastique, les portes et les éléments structurels;
 - les zones autour des points d'accès, telle la porte du compartiment du sorbant;
 - les zones où il y a des produits et des joints d'étanchéité mal ajustés, mal appliqués ou dégradés, ou encore les endroits où de tels produits ou joints sont manquants;
 - les trous de serrure;
 - les trous de passage de fils électriques, de composants d'éclairage ou d'autres accessoires;
 - les zones où il y a des fixations lâches ou déformées, ou encore les endroits où des fixations sont manquantes.
- Vérifier qu'il n'y a pas de points de fuite suffisamment grands pour permettre le passage d'une carte de crédit ou d'une feuille de papier d'imprimante.

Vérifier l'étanchéité à l'air avec la méthode employant du CO₂.

- Consigner tous les renseignements pertinents au sujet de la vitrine d'exposition.
 - Noter si des objets poreux ou des socles avec un volume interne important (cavité) sont présents dans la vitrine d'exposition. Une image de la vitrine testée peut s'avérer utile ultérieurement pour vérifier les détails.
 - Noter la présence de gel de silice et de charbon actif dans le compartiment pour le contrôle de l'environnement.
 - Consigner la température et l'HR à l'intérieur de la vitrine d'exposition.
 - Pour les armoires de mise en réserve ou les caisses de transport, noter si certains objets sont placés dans des contenants de protection plus petits, comme des sacs en plastique bien scellés ou des boîtes en carton bien fermées.
 - Indiquer l'emplacement de la vitrine testée (bâtiment et pièce).
- Enregistrer le niveau de fond de CO₂ en réduisant au minimum les perturbations pendant la mesure.
- Placer un ou plusieurs appareils de mesure étalonnés à l'intérieur de la vitrine d'exposition en veillant à ce qu'il y ait une bonne circulation de l'air et à ce que l'enregistrement de données soit paramétré à une vitesse adaptée à la durée de l'expérience.
- Fermer la vitrine d'exposition.
- Injecter le CO₂ dans la vitrine en utilisant une ouverture aussi petite que possible afin de créer une concentration de départ de 3 000 ppm à 6 000 ppm.
- Sceller la vitrine d'exposition.
- Garder en tête que la période de stabilisation peut durer jusqu'à 40 heures, selon la structure de la vitrine d'exposition.
- Prévoir suffisamment de temps pour qu'il y ait un changement significatif dans la diminution de la concentration.
- Enregistrer une dernière lecture du niveau de fond lorsque l'expérience est terminée.

Annexe B : Loi de Graham

Les fuites sont souvent attribuables à la circulation de l'air. Un mouvement d'air important est dû à un écart de pression entre l'air extérieur et l'air intérieur, et cet écart est principalement causé par les variations de pression atmosphérique et de température. Lorsque les interstices et les trous sont moins nombreux ou plus petits et que l'environnement est plus stable, les modes de diffusion peuvent avoir une incidence plus importante sur le taux de fuite dans son ensemble. La diffusivité des grands vitrages acryliques ou des panneaux de bois (artificiels) dans une vitrine d'exposition peut devenir le principal contributeur du taux d'échange d'air en l'absence d'interstices et de trous importants.

Il peut être nécessaire d'envisager une correction de la valeur d'étanchéité à l'air lorsque le mode de diffusion domine le processus global de fuite. Cette correction est fondée sur la loi de Graham. Souvent, l'étanchéité à l'air est déterminée à l'aide d'un gaz traceur différent du gaz d'intérêt, par exemple lorsque l'étanchéité à l'air d'un contenant de protection est obtenue à l'aide d'un gaz traceur comme le CO₂ et qu'il est nécessaire d'appliquer le résultat au contrôle de la vapeur d'eau en utilisant la quantité optimale de gel de silice. Les deux gaz ont des vitesses de diffusion différentes qui définissent leurs valeurs d'étanchéité à l'air respectives. La loi de Graham (équation 6) permet de transposer la valeur d'étanchéité à l'air du gaz traceur au gaz d'intérêt.

Équation 6 :

$$TÉA_1 TÉA_2 = PM_2 PM_1$$

Où

$TÉA$ = taux d'échange d'air (1/jour)

PM = poids moléculaire (en g/mol)

1 et 2 = gaz 1 et gaz 2

Par exemple, si l'on obtient une étanchéité à l'air de 0,100/jour avec le CO₂ comme gaz traceur, la valeur devient 0,156/jour [0,156 = 0,100 × racine carrée de (44/18)] pour le taux d'échange d'air de la vapeur d'eau. Consulter le tableau 5 pour obtenir une liste des conversions des taux d'échange d'air. Si l'on considère uniquement le mode de diffusion, que l'on vise un taux d'échange d'air maximal pour l'eau de 0,1/jour et que le gaz traceur utilisé pour déterminer l'étanchéité à l'air est le CO₂, le taux d'échange d'air mesuré doit être inférieur à 0,064/jour (0,100 ÷ 1,563 = 0,064).

Tableau 5 : Conversion du taux de fuite du gaz traceur CO₂ vers le gaz d'intérêt

Gaz d'intérêt	Poids moléculaire (en g/mol)	Facteur de conversion
Dioxyde de carbone	44,01	1,000
Vapeur d'eau	18,02	1,563
Oxygène	32,00	1,173
Acide acétique	60,05	0,856
Acide formique	46,03	0,978
Sulfure d'hydrogène	34,08	1,136
Ozone	48,00	0,957
Dioxyde d'azote	46,00	0,978
Oxyde nitreux	44,01	1,000
Dioxyde de soufre	64,01	0,829

En pratique, aucune correction n'est nécessaire lorsque le taux d'échange d'air est supérieur à 1/jour; une correction partielle pourrait être pertinente en dessous de 0,3/jour si la pression à l'intérieur du contenant de protection est stable. Les fluctuations quotidiennes de la pression atmosphérique, de l'intensité lumineuse et de la température peuvent provoquer un écart de pression entre la pièce et le contenant de protection. L'infiltration et l'exfiltration deviennent le mécanisme dominant lorsque ces fluctuations sont importantes.

Dans un environnement stable, une approche conservatrice préconise de considérer une contribution de la diffusion de 50 % dans l'ensemble des fuites pour une étanchéité à l'air mesurée en dessous de 0,3/jour. Par exemple, si le taux d'échange d'air mesuré avec du CO₂ est de 0,100/jour et que l'accent est mis sur le contrôle de l'HR dans la vitrine d'exposition, le taux d'échange d'air_{eau} global devient 0,128/jour [(0,5 × 0,1) + (0,5 × 0,156)].

Si nous considérons une erreur expérimentale possible jusqu'à 20 % (consulter [Étude de cas 7 : erreur et reproductibilité](#)), il peut être plus sûr d'envisager un taux d'échange d'air_{eau} de 0,154/jour (0,128 × 1,2) au moment de déterminer la quantité de sorbant d'humidité (équation 1). Pour les contenants de protection très étanches à l'air, la diffusion des gaz et les erreurs expérimentales peuvent devenir des facteurs importants à considérer et à ajuster correctement. Dans cet exemple, une mesure du taux d'échange d'air_{CO2} de 0,10/jour devient un taux d'échange d'air_{eau} de 0,15/jour utilisé pour le contrôle de l'HR, ce qui est supérieur de plus de 50 %.

Bibliographie

AIC Wiki. [Sealed exhibit cases](#) (en anglais seulement), 2020.

AIC Wiki. [Degree of case seal: air exchange rates](#) (en anglais seulement), 2021.

Beltran, V. L., J. Druzik et S. Maekawa. « Large-scale Assessment of Light-induced Color Change in Air and Anoxic Environments », *Studies in Conservation*, vol. 57, n° 1 (2012), p. 42-57.

Berlier, K., et M. Frère. « Adsorption of CO₂ on Microporous Materials. 1. On Activated Carbon and Silica Gel », *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 42, n° 3 (1997), p. 533-537.

Brimblecombe, P., et B. Ramer. « Museum Display Cases and the Exchange of Water Vapour », *Studies in Conservation*, vol. 28, n° 4 (1983), p. 179-188.

British Standards Institution. BS 5454:1977, *Recommendations for the Storage and Exhibition of Archival Documents*, Londres (Royaume-Uni), British Standards Institution, 1977.

British Standards Institution. BS 5454:1989, *Recommendations for the Storage and Exhibition of Archival Documents*. Londres (Royaume-Uni), British Standards Institution, 1989.

Calver, A., A. Holbrook, D. Thickett et S. Weintraub. « Simple Methods to Measure Air Exchange Rates and Detect Leaks in Display and Storage Enclosures », dans *ICOM-CC 14th Triennial Meeting, The Hague, 12–16 September 2005: Preprints* (sous la direction de I. Sourbes-Verger), Londres (Royaume-Uni), James & James, 2005, p. 597-609.

Cassar, M., et G. Martin. « The Environmental Performance of Museum Display Cases », dans *Preventive Conservation: Practice, Theory and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12–16*

September 1994 (sous la direction de A. Roy et P. Smith) Londres (Royaume-Uni), International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1994, p. 171-173.

Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. [Dioxyde de carbone](#), Hamilton (Ontario), Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2017.

Choong, E.T., et P.J. Fogg. « Moisture Movement in Six Wood Species », *Forest Products Journal*, vol. 18, n° 5 (1968), p. 66-70.

Daniel, V., et S. Maekawa. « The Moisture Buffering Capability of Museum Cases », dans *Materials Issues in Art and Archaeology III, San Francisco, 27 April to 1 May 1992: Proceedings* (sous la direction de P. B. Vandiver, J. R. Druzik, G. S. Wheeler et I. C. Freestone), vol. 267, Pittsburgh (Pennsylvanie), Materials Research Society, 1992, p. 453-458.

Daniel, V., et F. L. Lambert. « Ageless™ Oxygen Scavenger: Practical Applications », *WAAC Newsletter*, vol. 15, n° 2 (1993), p. 12-14.

Grau-Bové, J., et M. Wu. IMPACT Tool, University College London, The Bartlett Institute for Sustainable Heritage, s. d.

Holmberg, J. G., et W. Kippes. « Improvement of Showcase Environment at the Silberkammer, Vienna », dans *Conservation Science 2002: Papers from the Conference Held in Edinburgh, Scotland, 22–24 May 2002* (sous la direction de J. Townsend, K. Eremin et A. Adriaens) Londres, (Royaume-Uni), Archetype Publications, 2003, p. 25-31.

Kigawa, R., H. Nochide, H. Kimura, Y. Miyazawa, S. Miura et T. Strang. « Carbon Dioxide Adsorption by Various Kinds of Materials in the Eradication of Museum Pest Insects », *Science for Conservation*, vol. 42 (2003), p. 79-86.

Kigawa, R., T. Strang, N. Hayakawa, N. Yoshida, H. Kimura et G. Young. « Investigation of Effects of Fumigants on Proteinaceous Components of Museum Objects (Muscle, Animal Glue and Silk) in Comparison with Other Non-chemical Pest Eradicating Measures », *Studies in Conservation*, vol. 56, n° 3 (2011), p. 191-215.

King R., J. Grau-Bové et K. Curran. « Plasticiser Loss in Heritage Collections: Its Prevalence, Cause, Effect, and Methods for Analysis », *Heritage Science*, vol. 8, article 123 (2020).

LeMone, P. « [Release of Carbon Dioxide by Individual Humans](#) » (en anglais seulement), *GLOBE Scientists' Blog*, s. 1., The GLOBE Program, 2008.

Maekawa, S., et K. Elert. *The Use of Oxygen-free Environments in the Control of Museum Insect Pests, Tools for Conservation*, Los Angeles (Californie), Getty Conservation Institute, 2003.

Meyer, B., et K. Hermanns. « Formaldehyde Release from Pressed Wood Products », dans *Formaldehyde: Analytical Chemistry Toxicology* (sous la direction de V. Turoski), Washington (D.C.), American Chemical Society, 1985, p. 101-116.

Michalski, S. « Leakage Prediction for Buildings, Cases, Bags and Bottles », *Studies in Conservation*, vol. 39, n° 3 (1994), p. 169-186.

Michalski, S. « CCI Microclimate Calculator: Leakage and Relative Humidity of Display Cases, Cabinets, Crates, Frames, Boxes, Bags, etc. », programme au format Excel (non publié), Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation), 2017.

Organisation internationale de normalisation. ISO 12569: 2017, *Performance thermique des bâtiments et des matériaux – Détermination du débit d'air spécifique dans les bâtiments – Méthode de dilution de gaz traceurs*, Genève (Suisse), Organisation internationale de normalisation, 2017.

Organisation internationale de normalisation/Commission électrotechnique internationale. ISO/IEC 7810:2019, *Cartes d'identification – Caractéristiques physiques* Genève (Suisse), Organisation internationale de normalisation/Commission électrotechnique internationale, 2019.

Padfield, T. « The Control of Relative Humidity and Air Pollution in Showcases and Picture Frames », *Studies in Conservation*, vol. 11, n° 1 (1966), p. 8-30.

Perino, M. « Air Tightness and RH Control in Museum Showcases: Concepts and Testing Procedures », *Journal of Cultural Heritage*, vol. 34, (2018), p. 277-290.

Robinson, L. « A Project for the Ages: Art, History, and Materials Science Converge to Preserve the 1297 Magna Carta », *Journal of Metals*, vol. 63, n° 6 (2011), p. 13-16.

Roussis, P. P. « Diffusion of Water Vapour in Polymethyl Methacrylate », *Journal of Membrane Science*, vol. 15, n° 2 (1983), p. 141-155.

Ryhl-Svendsen, M., et J. Glastrup. « Acetic Acid and Formic Acid Concentrations in the Museum Environment Measured by SPME-GC/MS », *Atmospheric Environment*, vol. 36, n° 24 (2002), p. 3909-3916.

Santé Canada. [Lignes directrices sur la qualité de l'air intérieur résidentiel](#), 2021.

Smedemark, S. H., M. Ryhl-Svendsen et A. Schieweck. « Quantification of Formic Acid and Acetic Acid Emissions from Heritage Collections under Indoor Room Conditions. Part I: Laboratory and Field Measurements », *Heritage Science*, vol. 8, article 58 (2020).

Smith, M., E. Hagan, A. Maheux et S. Tse. « [A Low-Oxygen Capable Storage and Display Case for the Proclamation of the Constitution Act](#) » (format PDF; en anglais seulement), *The Book and Paper Group Annual*, vol. 35 (2016), p. 81-88.

- Solomon, S., et coll. « Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », dans *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis* (sous la direction de S. Solomon et coll.), Cambridge (Royaume-Uni), Cambridge University Press, 2007, p. 33-34.
- Sonderegger, W., et P. Niemz. « Thermal Conductivity and Water Vapour Transmission Properties of Wood-Based Materials », *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 67 (2009), p. 313-321.
- Stanley, B., A. Xavier-Rowe et B. Knight. « Displaying the Werner Collection: A Pragmatic Approach to Display Cases », *The Conservator*, vol. 27, n° 1 (2003), p. 34-46.
- Strang, T. *Studies in Pest Control for Cultural Property*, thèse de doctorat, University of Gothenburg, 2012.
- Tétreault, J. *Polluants dans les musées et les archives : évaluation des risques, stratégies de contrôle et gestion de la préservation*, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2003.
- Tétreault, J. *Produits utilisés en conservation préventive*, Bulletin technique 32, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2017.
- Tétreault, J. *Lutte contre les polluants dans les musées et les archives*, Bulletin technique 37, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2021.
- Tétreault, J. et P. Bégin. *Gel de silice : contrôle passif de l'humidité relative*, Bulletin technique 33, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2018.
- Tétreault, J., et E. Stamatopoulou. « Determination of Concentrations of Acetic Acid Emitted from Wood Coatings in Enclosures », *Studies in Conservation*, vol. 42, n° 3 (1997), p. 141-156.
- Tétreault, J., J. Sirois et E. Stamatopoulou. « Study of Lead Corrosion in Acetic Acid Environments », *Studies in Conservation*, vol. 43, n° 1 (1998), p. 17-32.
- Thickett, D. *Post Excavation Changes and Preventive Conservation of Archaeological Iron*, thèse de doctorat, University of London, 2012.
- Thickett, D. « Specifying Air Exchange Rates of Showcases », dans *Chemical Interactions between Cultural Artefacts and Indoor Environment* (sous la direction de M. Adriaens, S. Bioletti et I. Rabin), Leuven (Belgique), Acco, 2018, p. 25-48.
- Thickett, D. communication personnelle, English Heritage, 12 juin 2020.
- Thickett, D., et N. Luxford. « Development of Show Cases for Archaeological Metals in Aggressive Environments », dans *Protection of Metal Artefacts. Metal 07: Interim Meeting of the ICOM-CC Metal Working Group, Amsterdam, 17–21 September 2007* (sous la direction de C. Degriigny et coll.), vol. 5, Amsterdam (Pays-Bas), Metal Working Group, 2007, p. 105-109.
-

Thickett, D., F. David et N. Luxford. « Air Exchange Rate – The Dominant Parameter for Preventive Conservation », *The Conservator*, vol. 29, n° 1 (2005), p. 19-34.

Thickett, D., P. Fletcher, A. Claver et S. Lambarth. « The Effect of Air Tightness on RH Buffering and Control », dans *Museum Microclimates: Contributions to the Copenhagen Conference, 19–23 November 2007* (sous la direction de T. Padfield et K. Borchersen), Copenhague (Danemark), The National Museum of Denmark, 2007, p. 245-251.

Thomson, G. « Stabilization of RH in Exhibition Cases: Hygrometric Half-Time », *Studies in Conservation*, vol. 22, n° 2 (1977), p. 85-102.

Underwriters Laboratories. UL 50, *Enclosures for Electrical Equipment, Non-Environmental Considerations*, 13^e édition, Northbrook (Illinois), Underwriters Laboratories Inc., 2015.

Watts, S., D. Crombie, S. Jones et S. A. Yates. « Museum Showcases: Specification and Reality, Costs and Benefits », dans *Museum Microclimates: Contributions to the Copenhagen Conference, 19–23 November 2007* (sous la direction de T. Padfield et K. Borchersen), Copenhague (Danemark), The National Museum of Denmark, 2007. p. 253-260.

Weschler, C. J., H. C. Shields et D. V. Naik. « Indoor Ozone Exposures », *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 39, n° 12 (1989), p. 1562-1568.

Yaseen, M., et H. E. Ashton. « Water Vapor Permeation through Clear Coatings », *Journal of Coatings Technology*, vol. 50, n° 645 (1978), p. 50-59.