

# Gel de silice : contrôle passif de l'humidité relative – Bulletin technique 33

Jean Tétreault et Paul Bégin

## Bulletins techniques de l'ICC

L'Institut canadien de conservation (ICC), situé à Ottawa, publie périodiquement des 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

Le présent Bulletin technique vise à expliquer le besoin de contrôler l'humidité relative (HR) dans un musée. Une HR variable peut endommager les matières organiques, tandis que d'autres objets, comme ceux qui sont faits de métal, exigent un faible point de consigne de l'HR pour garantir une conservation optimale. Le contrôle de l'HR peut être effectué de manière passive au moyen de sorbant d'humidité, dont le plus courant est le gel de silice, dans un contenant de protection, comme une vitrine d'exposition. Le présent Bulletin fournit une équation basée sur des évaluations du pouvoir tampon de produits commerciaux courants afin d'aider à déterminer la quantité de sorbant requise. Il décrit également différentes façons d'utiliser l'équation dans divers scénarios et propose des méthodes pour conditionner un sorbant d'humidité.

### Auteurs

Jean Tétreault a obtenu une maîtrise en chimie analytique de l'Université de Montréal en 1989 et il travaille depuis comme scientifique en conservation à la Division des services de préservation 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 ambiantes 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. Depuis 1998, il est également membre du conseil d'administration du Groupe de travail sur la pollution de l'air intérieur, qui organise des conférences tous les deux ans.

Paul Bégin a obtenu un baccalauréat spécialisé en chimie de l'Université Laurentienne en 1986 et a ensuite travaillé dans le laboratoire de recherche et développement chez Produits forestiers E.B. Eddy Ltée. En 1988, il a accepté un poste de chimiste en conservation du papier aux Archives nationales du Canada, où il a principalement travaillé sur la stabilité du papier. Il a effectué, notamment, des études sur la désacidification, le vieillissement accéléré et la permanence du papier. En 1993, son poste a été transféré à l'ICC. Paul a participé à une étude conjointe avec l'Institut canadien de recherches sur les pâtes et papiers concernant l'effet de la lignine sur la permanence du papier, ce qui a mené à la conception d'une norme canadienne sur le papier permanent. Il a aussi participé à un autre projet de recherche collaboratif organisé par l'Institute for Standards Research de l'American Society for Testing and Materials (ISR/ASTM), qui a donné lieu à la conception de méthodes d'essais de vieillissement accéléré du papier. Il travaille actuellement au sein de la Division de la science de la conservation de l'ICC, où il continue d'étudier la stabilité et la conservation du papier.

Avis de non-responsabilité : Les renseignements présentés dans la présente ressource 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 ou une

température inadéquates dans un musée.

## Table des matières

- [Liste des abréviations et des symboles](#)
- [Introduction](#)
- [Qu'est-ce que l'humidité relative?](#)
- [Pourquoi contrôler l'humidité relative?](#)
- [Comment peut-on contrôler une humidité relative inadéquate?](#)
- [Utilisation passive de sorbant dans les contenants de protection](#)
  - [Humidité absolue](#)
  - [Équilibre hygrométrique](#)
  - [Réservoir d'humidité donné](#)
  - [Quantité de sorbant requise](#)
  - [Taux de renouvellement de l'air](#)
  - [Surveillance](#)
- [Scénarios](#)
  - [Maintenir au minimum les variations de l'humidité relative](#)
  - [Maintenir l'environnement plus sec que le niveau ambiant](#)
  - [Maintenir l'environnement plus humide que le niveau ambiant](#)
- [Comment conditionner un sorbant](#)
  - [Séchage du sorbant](#)
  - [Humidification du sorbant](#)
- [Mesures](#)
  - [Mesure de l'humidité relative générée par le sorbant](#)
  - [Mesure du poids du sorbant](#)
  - [Ajout d'un sorbant sec ou d'un sorbant humide pour faciliter l'ajustement du niveau d'humidité du sorbant](#)
- [Fournisseurs](#)
- [Annexe 1 : Détermination du réservoir d'humidité donné](#)
  - [Détermination de l'équilibre hygrométrique](#)
  - [Calcul de M et de M<sub>H</sub>](#)
- [Annexe 2 : Équilibre hygrométrique](#)
- [Bibliographie](#)

## Liste des abréviations et des symboles

### Abréviations

**AIC** - American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works

**CVC** - chauffage, ventilation et climatisation

**HA** - humidité absolue

**HR** - humidité relative

**ICC** - Institut canadien de conservation

**ICOM-CC** - Comité pour la conservation du Conseil international des musées

**SH** - sorbant humide

### Symboles

°C - degré Celsius

Cm - centimètre

**g** - gramme  
**H<sub>2</sub>O** - eau  
**kg** -kilogramme  
**m** - mètre  
**M** - réservoir d'humidité donné  
**M<sub>H</sub>** - réservoir d'humidité donné avec hystérésis ajustée  
**mL** - millilitre  
**N** -taux de renouvellement de l'air  
**T** - température

## **Introduction**

Ce Bulletin porte sur l'utilisation de sorbant d'humidité, qui comprennent les gels de silice et les absorbeurs d'humidité, en vue de maintenir un taux d'HR stable ou de maintenir un taux d'HR précis dans des contenants de protection, comme les vitrines d'exposition, les armoires et les boîtes de mise en réserve et les caissons de transport. Les taux d'HR précis requis sont généralement définis par l'institution propriétaire de l'objet patrimonial. Il existe différents types de sorbants d'humidité sur le marché, mais peu sont conçus pour le domaine de la préservation du patrimoine. Ce Bulletin résume une évaluation impartiale de la performance de sorbants du commerce en matière d'absorption de l'humidité. En consultant les résultats de performance, les professionnels de la préservation du patrimoine peuvent déterminer la quantité de sorbant requise afin de maintenir une HR adéquate pour leurs objets, selon la conception de contenant de protection et les conditions ambiantes présentes. Diverses méthodes de conditionnement des sorbants d'humidité avant leur utilisation dans un contenant de protection sont également présentées. Les aspects plus techniques du présent document, comme les équations et les tableaux de données, sont inclus afin de garantir l'utilisation appropriée de sorbant pour un contrôle optimal de l'HR.

### **Qu'est-ce que l'humidité relative?**

L'HR est une mesure commune de l'humidité dans un milieu précis (à l'extérieur, dans une pièce ou dans une vitrine d'exposition). Sur le plan technique, l'HR est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau dans l'air et la quantité maximale d'eau pouvant être contenue dans l'air à une température donnée, exprimé en pourcentage. L'HR peut aussi être définie comme le rapport entre la pression de vapeur d'eau réelle et la pression de vapeur de saturation.

### **Pourquoi contrôler l'humidité relative?**

L'humidité dans le milieu ambiant influence la préservation de nombreux types d'objets. Si l'humidité est trop élevée, le taux de dégradation des papiers et des teintures photographiques attribuable à l'hydrolyse augmente, le risque de corrosion des métaux est accru et de la moisissure peut se développer. En revanche, si l'humidité est trop basse, les objets métalliques seront préservés, mais de nombreux objets organiques, comme les peintures, les meubles en bois et les livres recouverts de cuir, peuvent perdre de leur souplesse et se fissurer en raison des variations dimensionnelles attribuables au stress exercé.

En plus des risques associés aux milieux très humides ou très secs, des problèmes surviennent lorsque l'HR subit des variations importantes. L'humidité des objets organiques a tendance à s'équilibrer en fonction de l'humidité du milieu environnant. Lorsqu'il y a des variations de l'HR, l'humidité des objets organiques s'ajuste aux variations de l'humidité dans l'air en absorbant ou en désorbant la vapeur d'eau. Ces cycles occasionnent de petites variations dimensionnelles dans les objets, ce qui peut provoquer la formation ou la propagation de fissures.

Les variations de l'HR peuvent également avoir une incidence sur les objets imprégnés de sel, comme certains métaux et céramiques archéologiques. Chaque sel a un seuil critique d'HR lui permettant de passer de l'état solide à l'état liquide. Au-delà de ce seuil critique, un sel est liquide et mobile et il peut réagir avec d'autres substances. En deçà de ce seuil, le même sel retourne à sa forme solide où il a un volume plus important qu'à l'état liquide, ce qui peut exercer des stress

localisés dans l'objet.

Pour toutes ces raisons, il est important d'éviter les taux d'HR trop secs ou trop humides ou les grandes variations d'HR dans le milieu environnant des objets vulnérables. Vous trouverez des renseignements plus généraux concernant l'HR inadéquate sur la page Web de l'ICC [Agent de détérioration : humidité relative inadéquate](#).

### **Comment peut-on contrôler une humidité relative inadéquate?**

Lorsqu'il est nécessaire d'ajuster l'HR à un taux précis (point de consigne) dans une pièce, on utilise fréquemment des systèmes actifs, comme des humidificateurs et des déshumidificateurs commerciaux, dans les petits établissements. Le contrôle de l'HR à l'intérieur de bâtiments plus récents et plus grands a tendance à dépendre d'un système central de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC). L'exposition ou la mise en réserve d'objets dans des contenants de protection à humidité contrôlée méritent d'être envisagés s'il est impossible de contrôler l'HR dans la pièce ou que l'exigence en matière d'HR pour certains objets est différente de ce qui est exigé pour le reste de la collection dans la pièce.

En ce qui concerne les contenants de protection, l'HR peut être contrôlée par un système actif ou passif. On parle de système actif lorsque l'HR d'un contenant ou de nombreux contenants est contrôlée à distance de façon mécanique et à l'aide de conduites d'air. Certains modules de contrôle mécanique de l'HR sont suffisamment petits pour pouvoir être intégrés à l'intérieur d'un contenant. On parle de système passif de contrôle de l'HR dans des contenants de protection lorsqu'un sorbant d'humidité est utilisé, mais sans qu'aucun système ne soit employé pour forcer le mouvement de l'air.

### **Utilisation passive de sorbant dans les contenants de protection**

On utilise généralement des perles de gel de silice conçues en tant que matériaux tampons comme sorbant d'humidité dans les systèmes passifs. Ce type de sorbant est parfois appelé « type A » ou « gel de densité régulière ». La bentonite (aussi appelée « montmorillonite ») et la zéolite ont également été utilisées comme absorbeurs d'humidité. De nombreux matériaux poreux, comme le bois et les textiles, peuvent agir comme matériaux tampons. En réalité, beaucoup de matériaux organiques faisant partie d'une collection peuvent jouer ce rôle. C'est pourquoi le sorbant d'humidité utilisé dans le contenant de protection doit être plus efficace que l'objet en matière d'absorption de la vapeur d'eau, et pourquoi il devrait être réparti de façon que la surface tampon soit plus grande.

Par le passé, il est souvent arrivé que les sorbants d'humidité ne répondent pas aux attentes des utilisateurs pour diverses raisons. Premièrement, les recommandations étaient plutôt rigides, indiquant une quantité fixe de sorbant par volume, indépendamment des autres paramètres susceptibles d'influer sur le contrôle de l'HR. Deuxièmement, soit la forte quantité de sorbant recommandée par certains professionnels du domaine décourageait leur utilisation, soit la faible quantité recommandée par certains distributeurs offrait un rendement insuffisant. Troisièmement, la conception d'une vitrine d'exposition et son étanchéité à l'air constituaient deux paramètres importants qui ont été sous-estimés au moment de déterminer la quantité de sorbant d'humidité requise.

Les sections suivantes présentent les concepts et méthodes nécessaires pour estimer la quantité de sorbant requise dans des contextes précis. Sont ensuite présentés des scénarios qui illustrent les utilisations typiques de sorbants en modes passifs.

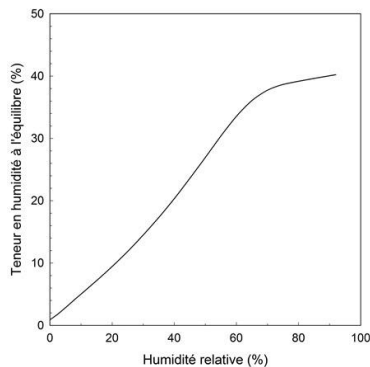
### **Humidité absolue**

On peut définir l'HR d'une autre manière en tenant compte de l'humidité absolue (HA). L'HA est le poids de la vapeur d'eau dans un volume d'air donné, exprimé en grammes par mètre cube ( $\text{g}/\text{m}^3$ ). La quantité d'eau dans l'air n'est pas toujours à son niveau maximal (à saturation). Ce niveau peut varier de sec à saturation. La mesure de l'HA ne peut, en elle-même, déterminer si l'air dans un contenant de protection arrive à saturation. La mesure de la température est également nécessaire étant donné que la quantité maximale de vapeur d'eau dans l'air dépend de la température. Plus l'air est chaud, plus la quantité de vapeur d'eau qu'un espace peut contenir sans qu'il y ait de condensation sera grande. La pression atmosphérique influence également la saturation, mais elle est considérée comme constante aux fins de simplification. Par conséquent, l'HR peut être définie comme le rapport (exprimé en %) entre l'HA mesurée et l'HA à

saturation à la température actuelle. Ainsi, dans un contenant de protection où la température est de 21 °C, la quantité maximale de vapeur d'eau pouvant être contenue dans un mètre cube est de 18,3 g. Il s'agit du point de saturation; tout excès de vapeur d'eau se condense, simplement. Dans ce cas, l'HR est de 100 %. Si, à la même température, la quantité de vapeur d'eau est réduite à 9,15 g, l'HR sera réduite à 50 % ( $100 \times 9,15 \div 18,3 = 50 \%$ ).

### Équilibre hygrométrique

L'équilibre hygrométrique (teneur normale en eau) est un concept important que l'on utilise pour comprendre le rendement d'un sorbant. Lorsque l'équilibre hygrométrique est atteint, la même quantité d'eau est adsorbée et désorbée. Dans le présent Bulletin, l'équilibre hygrométrique est défini comme le poids de l'eau dans un matériau exprimé sous forme de pourcentage de son poids sec ( $100 \times \text{g H}_2\text{O}$  par poids en g de sorbant sec). Comme c'est le cas avec tout matériau hygroscopique, l'humidité dans le sorbant est fortement influencée par la température et l'HR dans le milieu environnant. Il existe un lien précis entre l'équilibre hygrométrique de chaque type de sorbant et l'HR dans l'air à une température précise. Ce lien est appelé l'isotherme de l'équilibre hygrométrique en fonction de l'HR. À une température stable, au fur et à mesure que l'HR augmente, l'équilibre hygrométrique augmente également, comme le montre la figure 1. Si la température change, l'isotherme de l'équilibre hygrométrique en fonction de l'HR change aussi. Le résultat souhaité est de minimiser, grâce au sorbant, les variations de l'HR; c'est ce que l'on appelle un phénomène tampon. En pratique, lorsque la vapeur d'eau s'infiltré dans un contenant de protection ou qu'elle en sort, le sorbant minimise le changement d'HR en absorbant ou en désorbant l'eau. Par conséquent, en présence d'une quantité adéquate de sorbant efficace, on observe peu de fluctuations de l'HR dans le contenant.

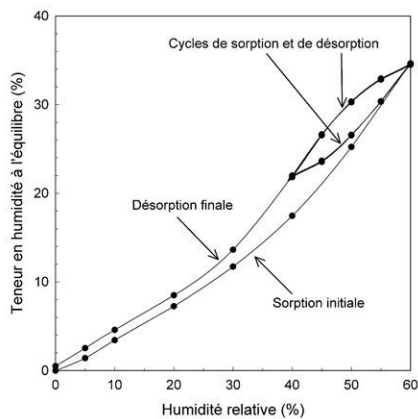


© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 128941-0009

Figure 1. Courbe de l'isotherme de l'équilibre hygrométrique en fonction de l'HR d'un échantillon de sorbant à une température de 20 °C.

### Réservoir d'humidité donné

On peut comparer les sorbants en examinant leurs valeurs respectives de réservoir d'humidité donné. Cette valeur est définie comme « M ». Il s'agit de la quantité d'eau (en grammes) qui est gagnée ou perdue par kilogramme de sorbant sec pour chaque variation de 1 % de l'HR. La valeur de « M » varie en fonction de la plage d'HR étudiée et de l'adsorption ou de la désorption d'un sorbant. Dans certains cas, la différence entre les courbes d'adsorption et de désorption est relativement importante. Les sorbants sont de meilleurs matériaux tampons lorsque l'HR augmente que lorsqu'elle baisse. On appelle ce phénomène l'hystérésis. Une valeur M corrigée liée à l'hystérésis, ici appelée  $M_H$  (Weintraub, 2002), peut être calculée à l'aide de l'équilibre hygrométrique sur la courbe d'adsorption à l'extrémité supérieure de la plage d'HR et de l'équilibre hygrométrique sur la courbe de désorption à l'extrémité inférieure de la plage d'HR, comme le montre la figure 2. On devrait utiliser la valeur  $M_H$  lorsqu'on doit réduire les variations positives et négatives de l'HR autour d'un point de consigne. Si l'on cherche à atteindre un seul objectif, comme maintenir l'HR à un niveau bas (sec) ou maintenir l'HR à un niveau plus élevé dans un contenant de protection que dans la pièce, la prise en compte de l'hystérésis n'est pas pertinente.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 128941-0001

Figure 2. Courbes de l'isotherme de l'équilibre hygrométrique en fonction de l'HR d'un échantillon de sorbant avec quatre cycles de sorption-désorption entre 40 % et 60 % d'HR et à une température de 20 °C.

Trois plages types d'HR sont utilisées dans le domaine de la conservation :

1. HR stabilisée à environ 50 %
2. HR maintenue à un niveau bas (sec)
3. HR maintenue à un niveau plus élevé (plus humide) que les conditions ambiantes moyennes

Le tableau 1 montre les valeurs  $M$  et  $M_H$  relatives aux sorbants d'humidité fréquemment utilisés pour ces trois scénarios. Il met en évidence que certains sorbants affichent un meilleur rendement que d'autres selon les conditions désirées. La sélection finale du sorbant dépend de la valeur  $M$  dans la plage d'HR d'intérêt, mais également du prix du sorbant, des coûts d'expédition et de l'aire réservée au sorbant dans le contenant de protection.

Les valeurs  $M$  et  $M_H$  dans le tableau 1 ont été obtenues à partir d'essais menés à une température de 20 °C, mais ces valeurs demeurent quasiment inchangées dans la plage des 15 °C à 25 °C. Avec une hausse de 5 °C, les valeurs  $M$  et  $M_H$  ne diminuent que de 3 % environ, ce qui est inférieur ou égal à la précision de la méthode utilisée pour déterminer ces valeurs. Des variations rapides de plus de 5 °C dans le contenant peuvent causer une perturbation trop importante de l'équilibre hygrométrique. Cela peut se produire lorsqu'un contenant de protection se trouve à proximité d'une source de chaleur ou de froid ou que la lumière solaire directe pénètre à l'intérieur de ce contenant. Le taux d'HR dans le contenant de protection peut alors varier dans une plage non souhaitée.

L'avantage de ce tableau de comparaison est que le même protocole (décrit à l'annexe 1) sert à comparer le rendement des sorbants d'humidité pour les trois scénarios énumérés ci-dessus.

**Tableau 1 : Réservoir d'humidité donné (g/kg pour une variation de l'HR de 1 %) à 20 °C\***

Sorbant d'humidité	$M_H$ 50 ± 10 % HR d'environ 50 %	$M$ 20 → 30 % Pour maintenir l'HR à un niveau bas	$M$ 60 → 50 % Pour maintenir l'HR à un niveau élevé
RHapid Gel	6,11 ± 2,16	4,48 ± 0,42	4,38 ± 1,40
PROsorb	5,42 ± 1,32	4,37 ± 0,10	4,25 ± 0,38
Art-Sorb	4,04 ± 0,80	2,84 ± 0,47	4,18 ± 0,49

**Tableau 1 : Réservoir d'humidité donné (g/kg pour une variation de l'HR de 1 %) à 20 °C\***

Sorbant d'humidité	M <sub>H</sub> 50 ± 10 % HR d'environ 50 %	M 20 → 30 % Pour maintenir l'HR à un niveau bas	M 60 → 50 % Pour maintenir l'HR à un niveau élevé
Gel de silice ordinaire (incolore, type A)	1,93 ± 0,44	5,48 ± 0,40	1,47 ± 0,16
Gel de silice orange	1,16 ± 0,26	4,92 ± 0,59	0,94 ± 0,14
Bentonite (Desi Pak)	1,19 ± 0,07	2,25 ± 0,03	1,11 ± 0,02
Tamis moléculaires 4A (zéolite)	0,33 ± 0,02	0,47 ± 0,04	0,31 ± 0,01

\* Les sorbants d'humidité évalués pour ce Bulletin ont été obtenus au cours de la période de 2013 à 2015. Il n'est pas garanti que de nouveaux lots de ces sorbants auront le même rendement. Consulter l'annexe 1 pour connaître la méthodologie.

#### Quantité de sorbant requise

La quantité réelle de sorbant requise pour contrôler l'HR dans un contenant de protection ne dépend pas uniquement du réservoir d'humidité donné du gel. De nombreuses variables sont utilisées, comme l'illustre l'équation 1 (Tétreault, 2003). Par mesure préventive, l'ajout d'une quantité supplémentaire de sorbant (30 % par exemple) est suggéré.

Équation 1 :

$$Q = \frac{C_{eq} D V N t}{M_H F}$$

Où

Q = quantité recommandée de sorbant sec (en kg)<sup>a</sup>

C<sub>eq</sub> = concentration de la vapeur d'eau au point d'équilibre (g/m<sup>3</sup>)<sup>b</sup>

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

V = volume net d'air dans le contenant de protection (en m<sup>3</sup>)

N = taux d'échange d'air (1/jour)<sup>d</sup>

t = nombre minimal de jours pendant lesquels la plage d'HR ciblée doit être maintenue (en jours)<sup>e</sup>

M<sub>H</sub> = 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 %)<sup>f</sup>

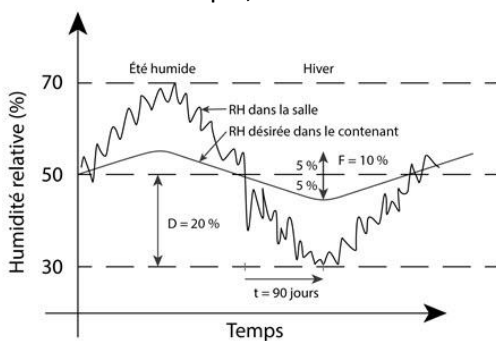
Remarques :

- Pour les sorbants en feuilles, il faut connaître la densité de sorbant dans la feuille (g/m<sup>2</sup>) pour déterminer la quantité de feuilles requise. Comme Q représente la quantité de sorbant sec nécessaire, il faudra le conditionner en fonction de l'HR ciblée (consulter la section [Comment conditionner un sorbant](#)).
- Au point d'équilibre, la concentration de vapeur d'eau (HA à saturation; HR de 100 %) varie selon la température (T en °C); par exemple, 17,3 g/m<sup>3</sup> à 20 °C, 18,3 g/m<sup>3</sup> à 21 °C, 20,0 g/m<sup>3</sup> à 22,5 °C. La concentration à des températures différentes peut être calculée au moyen de l'équation suivante :

Équation 2 :

$$C_{eq} = 7,36 e^{(T/19,96)} - 2,75$$

- c. Par exemple, si l'HR moyenne minimale (ou maximale) dans l'air se trouvant à l'extérieur du contenant de protection est de 30 % et que l'HR ciblée à l'intérieur est de 50 %, la différence est de 20 %, ainsi  $D = 0,20$  (figure 3).
- d. Le taux de renouvellement de l'air, basé idéalement sur la vapeur d'eau. Si une mesure précise de l'étanchéité à l'air du contenant de protection ne peut être prise, il est alors fréquent d'utiliser la valeur d'un échange d'air par jour pour représenter une vitrine d'exposition typique à isolation modérée.
- e. La période pendant laquelle les conditions varient de modérées (par exemple, l'HR moyenne annuelle) à extrêmes. Par exemple, il faut environ 90 jours pour passer de conditions modérées, dans lesquelles l'HR pourrait avoisiner la valeur moyenne annuelle (ou le point de consigne de 50 %), à des conditions hivernales sèches (figure 3).
- f. Par exemple, si la variation maximale permise de l'HR est de  $\pm 5\%$ , alors  $F = 10\%$  (figure 3).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 128941-0007

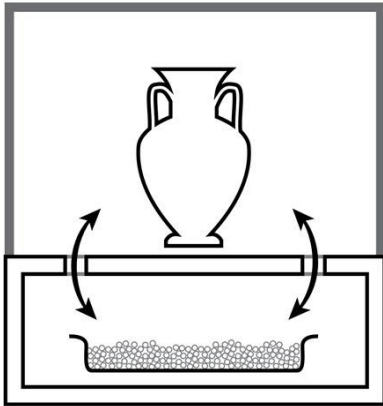
Figure 3. Schéma d'un hygrographe montrant certains paramètres de l'équation 1.

### Taux de renouvellement de l'air

Avoir un contenant de protection présentant un faible taux de renouvellement de vapeur d'eau est la meilleure façon de minimiser l'effet du climat externe et de réduire la quantité de sorbant requise. Cependant, le taux de renouvellement ( $N$ ) est un paramètre difficile à déterminer. À titre de référence, on mentionne souvent qu'une vitrine d'exposition typique a un taux d'échange d'air de un par jour (Padfield, 1966). Ce taux de un par jour peut être atteint pour les vitrines d'exposition lorsqu'il n'y a aucune ouverture entre les vitres et que les joints de la structure sont scellés au moyen de colles et de scellants. On fait parfois référence au « test d'insertion d'une feuille de papier ou d'une carte de crédit » : un taux d'échange d'air de un ou inférieur à un est atteint lorsqu'il n'est pas possible d'insérer une feuille de papier ou une carte de crédit dans un interstice (petite fente) entre deux éléments composant la vitrine.

En ce qui concerne la perméabilité à la vapeur d'eau, le verre constitue une meilleure vitre étant donné que l'acrylique (Plexiglas) est légèrement perméable. Une vitrine d'exposition en verre et en métal bien conçue peut facilement atteindre un taux d'échange d'air de 0,3 par jour. Lorsqu'il s'agit d'une vitrine d'exposition, il est important de se rappeler que l'échange d'air entre la zone où se trouve l'objet et la zone où se trouve le sorbant doit être plus important que l'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur du contenant de protection. Par exemple, la vitrine d'exposition devrait être aussi étanche à l'air que possible; les ouvertures à l'intérieur de la vitrine d'exposition devraient être discrètes, mais assez grandes pour permettre un mouvement de l'air suffisant entre le haut de la vitrine où l'objet est exposé et le bas de la vitrine où le sorbant est installé, comme le montre la figure 4. Pour les grandes vitrines d'exposition, notamment les vitrines hautes, il vaut mieux, parfois, forcer la ventilation afin de garantir un air bien mélangé dans le contenant de protection.





© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 128941-0003

Figure 4. Coupe transversale d'une vitrine d'exposition montrant le sorbant dans la partie inférieure de la vitrine d'exposition et un objet dans la partie supérieure. L'ouverture entre les deux parties devrait permettre un mouvement de l'air suffisant pour garantir le contrôle optimal de l'HR au moyen du sorbant.

Il existe des techniques pour détecter les fuites ou mesurer les taux de renouvellement (Calver et coll., 2005). Les valeurs du taux de fuite déterminées au moyen d'un gaz traceur, comme le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et l'oxyde de diazote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), devront être converties à un taux de fuite équivalent pour la vapeur d'eau (Brimblecombe et Ramer, 1983). On peut trouver des données sur la perméabilité de la vapeur d'eau des vitres de même que des conseils sur la conception des vitrines d'exposition dans [Polluants dans les musées et les archives : évaluation des risques, stratégies de contrôle et gestion de la préservation](#).

### Surveillance

Lorsqu'il y a des facteurs inconnus dans les divers paramètres que comporte l'estimation de la quantité de sorbant requise, la surveillance de l'HR au moyen d'instruments fiables est fortement recommandée. Les instruments non étalonnés et instables peuvent occasionner des erreurs graves dans la mesure et le contrôle de l'HR. Il est relativement fréquent d'observer une variation de 5 % dans la valeur d'HR lorsqu'on utilise un hygromètre. L'instrument le plus fiable et le plus abordable pour mesurer l'HR est le psychromètre, qui est constitué d'un thermomètre mouillé et d'un thermomètre sec. On peut utiliser le psychromètre pour mesurer l'HR et valider la mesure de tout hygromètre.

### Scénarios

Des scénarios ont été sélectionnés pour montrer la façon d'utiliser l'équation 1. Les paramètres utilisés sont établis aux conditions initiales suivantes :

$C_{eq} = 17,3 \text{ g/m}^3$  de vapeur d'eau, au point d'équilibre à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; l'HR moyenne annuelle est de 50 %

$D = 0,20$  pour la différence entre l'HR à l'extérieur du contenant et l'HR ciblée à l'intérieur du contenant de protection (70 % [forte] ou 30 % [faible], comparativement à l'HR de 50 % :  $0,70 - 0,50 = 0,20$ )

$V = 1 \text{ m}^3$  volume d'air net dans le contenant de protection

$N =$  taux d'échange d'air de 1 (1/jour)

$t = 90$  jours (nombre minimal de jours pendant lesquels la plage d'HR ciblée doit être maintenue)

$M_H = 3 \text{ g/kg}$  pour une variation de l'HR de 1 %

$F = 20 \%$  lorsque la plage ciblée de variation de l'HR est de  $\pm 10 \%$

### Maintenir au minimum les variations de l'humidité relative

Maintenir de faibles variations de l'HR dans le contenant de protection pendant toute l'année constitue probablement l'utilisation de sorbant la plus durable pour ce qui est des objets organiques, simplement parce qu'il n'y a pas de besoin en entretien. Cependant, la surveillance de l'HR dans le contenant est importante pour garantir que la variation visée soit maintenue, particulièrement dans des conditions climatiques extrêmes, comme des périodes humides pendant l'été

ou des périodes sèches pendant l'hiver. Ces climats peuvent influencer sur les conditions dans la pièce, lesquelles peuvent à leur tour influencer sur l'HR à l'intérieur des contenants de protection contrôlés.

Dans les conditions initiales définies ci-dessus, un contenant de protection ayant un taux de renouvellement équivalent à un taux d'un échange d'air par jour, dans une pièce ayant une variation de l'HR de  $\pm 20\%$ , nécessitera  $5,2 \text{ kg/m}^3$  de sorbant sec si une variation interne maximale de l'HR de  $\pm 10\%$  est requise. Ces  $5,2 \text{ kg}$  de sorbant sec devront être conditionnés à une HR de  $50\%$  (consulter les sections [Mesures](#) et [Comment conditionner un sorbant](#)).

$$Q = (C_{eq} D V N t) \div (M_H F) = (17,3 \times 0,20 \times 1 \times 1 \times 90) \div (3 \times 20) = 5,2 \text{ kg}$$

Si le taux de fuite (N) est réduit de moitié ou que la  $M_H$  est deux fois plus efficace, seuls  $2,6 \text{ kg}$  de sorbant sec seront requis (plus l'ajustement du conditionnement).

### **Maintenir l'environnement plus sec que le niveau ambiant**

La préservation des objets en métaux et des objets contaminés par le sel sera grandement améliorée si ces objets sont conservés dans un milieu sec. Prenons l'exemple de trophées en argent dans une vitrine d'exposition, qui seront mieux protégés dans un environnement sec. L'HR dans la pièce est relativement stable à  $50\%$ , et les trophées devraient être maintenus au sec, à une HR allant de  $20\%$  à  $30\%$ . L'HR initiale dans la vitrine est de  $20\%$ . Lorsque l'HR atteint  $30\%$ , le sorbant doit être changé. Le remplacement du sorbant devrait être effectué une fois par an seulement. Dans ce scénario,  $D = 0,30$  ( $50\% - 20\%$ ),  $F = 20\%$  (F représente la plage d'HR  $\pm 10\%$  permise, même si l'objectif dans le présent cas est de  $+10\%$ ) et  $t = 365$  jours.

$$Q = (17,3 \times 0,30 \times 1 \times 1 \times 365) \div (3 \times 20) = 31,6 \text{ kg}$$

Une quantité de  $31,6 \text{ kg}$  de sorbant sec constitue une quantité considérable pour un contenant de protection de  $1 \text{ m}^3$ . Si l'étanchéité pouvait être améliorée par un facteur de 3 ( $N = 1/3$  jour), seuls  $10,5 \text{ kg}$  seraient nécessaires (plus l'ajustement du conditionnement).

Pour la préservation du papier contre l'hydrolyse catalysée par un acide, il vaut mieux éviter les périodes d'HR élevée. Si la pièce maintient une HR sous les  $50\%$  pendant neuf mois par année et que l'HR a tendance à grimper jusqu'à  $65\%$  au cours de l'été, le scénario suivant pourrait être utilisé. Pour limiter à  $50\%$  la hausse de l'HR dans la vitrine d'exposition, un point de consigne pourrait être déterminé à  $45\%$  avec une hausse permise de l'HR de  $5\%$  pendant trois mois. Dans ce scénario,  $D = 0,20$  ( $65\% - 45\%$ ),  $F = 10\%$  (de manière semblable à l'exemple ci-dessus, une hausse de  $5\%$  est permise) et  $t = 90$  jours.

$$Q = (17,3 \times 0,20 \times 1 \times 1 \times 90) \div (3 \times 10) = 10,4 \text{ kg}$$

Dans le scénario ci-dessus, il est fort possible qu'il ne soit pas nécessaire de remplacer le sorbant, car si l'HR dans la pièce atteint un taux aussi élevé que  $65\%$  en été, ce taux sera très probablement inférieur à  $45\%$  en hiver (plus sec). Par conséquent, au début de la période humide, le sorbant serait équilibré à  $45\%$  ou légèrement en dessous, puis il serait prêt à contrôler l'HR au cours de la prochaine période humide.

Maintenir un environnement plus sec dans la vitrine que dans la pièce est généralement une option réaliste dans le cas d'une exposition temporaire ou pour le transport. Par exemple, lorsqu'il n'y a que des objets inorganiques dans un contenant de protection et que ceux-ci doivent être maintenus temporairement au sec, une solution simple consiste à utiliser un sorbant sec ( $0-5\%$  HR) et à le remplacer lorsque l'HR atteint la valeur maximale autorisée. Cependant, pour une utilisation permanente, il peut être trop long de reconditionner le sorbant, et il y a un risque que le taux d'HR soit incorrect s'il y a un manque de surveillance.

### **Maintenir l'environnement plus humide que le niveau ambiant**

Dans ce scénario, l'HR annuelle moyenne de la pièce est de  $40\%$ , et une HR de  $50\% \pm 5\%$  est nécessaire pour un objet organique très fragile. Dans ce scénario,  $D = 0,10$  ( $50\% - 40\%$ ),  $F = 10\%$  (F représente la plage d'HR de  $\pm 5\%$  permise, même si l'objectif ici est de  $-5\%$ ) et  $t = 90$  jours.

$$Q = (17,30 \times 0,10 \times 1 \times 1 \times 90) \div (3 \times 10) = 5,2 \text{ kg}$$

Avant le début de la période sèche, le sorbant devrait être équilibré à un point situé dans la plage d'HR de  $50\%$  à  $55\%$ .

Une surveillance régulière est recommandée.

### **Comment conditionner un sorbant**

Conditionner un sorbant signifie ajuster sa teneur en humidité au taux d'HR désiré. Cela permettra l'optimisation de son pouvoir tampon. Il faut se rappeler que la quantité ( $Q$ ) fournie à l'aide de l'équation 1 est basée sur un sorbant sec et qu'un ajustement doit être effectué pour déterminer la quantité de sorbant conditionné (consulter la section [Mesures](#)). Si les sorbants reçus ou dont dispose votre installation ne sont pas conditionnés au niveau désiré, un certain travail sera nécessaire. Il existe diverses méthodes pour ajuster l'équilibre hygrométrique du sorbant à un niveau souhaité (Lafontaine, 1984; U.S. National Park Service, 1999 et Weintraub, 2002). Le séchage et l'humidification du sorbant ainsi que la mesure de l'HR générée par le sorbant sont les trois principaux aspects du conditionnement du sorbant pour une HR précise. La commande de sorbants préconditionnés est une bonne option si l'objectif consiste uniquement à minimiser les variations de l'HR à court terme sans qu'une régénération périodique ne soit nécessaire.

### **Séchage du sorbant**

Le séchage du sorbant à 115 °C pendant la nuit est souvent recommandé si le sorbant contient des colorants indicateurs d'HR (bleu ou orange). Art-Sorb ne peut être chauffé dans un four à une température supérieure à 65 °C; sinon, certaines perles se fragmenteront en petits morceaux. Les autres sorbants peuvent être séchés à des températures plus élevées (jusqu'à 200 °C) pendant des périodes plus courtes, mais de petits débris peuvent être produits. Certains sorbants d'humidité peuvent être séchés à l'aide d'un four à micro-ondes, mais cela doit être confirmé par le fabricant ou le distributeur.

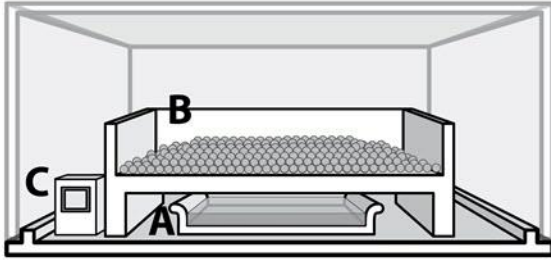
### **Humidification du sorbant**

La nature du sorbant utilisé déterminera la façon dont il devra être humidifié. On trouve de nombreux avertissements dans la documentation selon lesquels il ne faut jamais ajouter d'eau liquide directement au gel de silice. À l'exception d'Art-Sorb, tous les gels de silice auxquels on a ajouté des gouttes d'eau se sont fissurés considérablement, et de petits fragments de perles se sont produits. Lorsqu'ils sont aspergés d'eau vaporisée, Art-Sorb et PROSorb ne sont pas endommagés, tandis que les autres sorbants sont altérés mais dans une moindre mesure. Une lente absorption de vapeur d'eau constitue la méthode la plus sécuritaire.

La hausse de la teneur en humidité du sorbant au moyen de vapeur d'eau peut être effectuée à l'aide d'une chambre commerciale à HR contrôlée ou d'une petite chambre dans laquelle se trouve un contenant ouvert de solution d'eau salée qui produit une HR précise au point d'équilibre, comme on peut le constater sur la figure 5. Par exemple, une solution aqueuse saturée de nitrate de magnésium [ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ] générera une HR de 54 %. Malheureusement, le sel utilisé pour préparer cette solution est coûteux.

L'étude de Greenspan (1977) comporte une liste de sels et de l'HR que chacun génère. Il faut éviter d'utiliser du dichlorure de magnésium hexahydrate ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [RH de 34 %]) étant donné qu'il peut rejeter du chlore. Le chlorure de sodium (NaCl) générera une HR de 75 % et ne rejettera pas de chlore. Malheureusement, il n'est pas toujours possible d'obtenir exactement l'HR voulue avec des solutions salines. Par exemple, on peut obtenir une HR de 54 % mais pas de 50 %.

Pour préparer la solution d'eau salée dans un récipient, il suffit d'ajouter de l'eau au sel et de remuer souvent le mélange. Par ailleurs, il faut s'assurer que quelques millimètres d'eau recouvrent la surface du sel en tout temps (vérifier périodiquement et ajouter de l'eau, au besoin).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 128941-0004

Figure 5. Exemple de petite chambre de conditionnement.

Il existe de nombreuses façons de construire une petite chambre de conditionnement. La chambre de conditionnement doit être étanche à l'air et transparente afin qu'il soit possible de lire les données sur le moniteur de l'hygromètre, à moins que la valeur de l'HR puisse être lue à distance. La chambre de conditionnement de la figure 5 est munie d'une base faite de contreplaqué peint à l'acrylique (latex). Toutes les autres parois de la chambre sont faites de panneaux de vitre en acrylique. Sur la base, il y a un récipient contenant une solution d'eau salée (A). Au-dessus du récipient, il y a un petit plateau où le sorbant est dispersé de manière uniforme (B). Entre la solution d'eau salée et le plateau, il y a suffisamment d'espace pour permettre un bon mouvement de l'air. Un hygromètre à l'intérieur de la chambre permet de surveiller l'HR (C).

Pour humidifier un sorbant à un taux d'humidité tel que 75 %, on commence par exposer le sorbant à de l'eau uniquement (au lieu d'une solution saline), dans un contenant, pendant quelques jours, afin d'accélérer le processus. Puis, lorsque l'humidité a presque atteint le taux désiré, on remplace le contenant d'eau par la solution d'eau salée adéquate.

### Mesures

La vérification de l'HR ou du bon équilibre hygrométrique (% g/g poids sec) constitue une importante mesure pour garantir que le taux d'humidité du sorbant est celui désiré. La vérification des sorbants secs n'est habituellement pas aussi essentielle, mais les sorbants humides devraient être quantifiés par des mesures de l'HR ou du poids.

### Mesure de l'humidité relative générée par le sorbant

Un hygromètre peut être utilisé à l'intérieur de la chambre de conditionnement (mécanique ou avec une solution d'eau salée) afin d'obtenir une indication de l'HR, mais il ne peut confirmer si le sorbant a atteint le taux d'humidité désiré. Étant donné que l'HR mesurée reflète l'HR générée par la solution saline plus que dans le sorbant, la mesure de l'HR doit être effectuée à l'extérieur de la chambre. Pour voir de manière facile et rapide si le taux d'HR du sorbant est équilibré au taux désiré, il suffit de placer environ 25 mL ou 20 g de sorbant et un petit hygromètre fiable dans un petit contenant bien scellé (en plastique ou en verre), comme sur la figure 6. Le capteur de l'hygromètre ne devrait pas toucher le gel. Lire périodiquement le taux d'HR sur l'hygromètre, jusqu'à ce que l'HR se stabilise. L'équilibre de l'HR devrait être atteint après une période de deux à six heures selon le réservoir d'humidité donné, le volume d'air libre dans le contenant et la différence entre l'HR dans la pièce et l'HR générée par le sorbant.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. ICC 128941-0005

Figure 6. Un hygromètre compact et 20 g de sorbant dans un sac de polyéthylène à fermeture éclair de 24 cm x 16 cm. Après quelques heures, le moniteur montre une HR stable de 40 %.

### Mesure du poids du sorbant

La quantité d'eau dont a besoin un sorbant pour atteindre l'équilibre à une HR précise est déterminée à l'aide de l'isotherme de l'équilibre hygrométrique en fonction de l'HR de ce sorbant. Si l'information relative à l'équilibre hygrométrique peut être obtenue auprès du distributeur ou dans la documentation (consulter l'annexe 2), on peut demander ou chercher l'information relative à l'équilibre hygrométrique correspondant à l'HR que l'on souhaite obtenir et déterminer la quantité d'eau requise. Par la suite, on pèse le sorbant sec et l'on introduit la quantité d'eau requise par la méthode la plus adéquate (gouttes, vaporisation ou vapeur; consulter la section [Humidification du sorbant](#)) jusqu'à ce que le poids désiré soit atteint.

Exemple : Conditionner le gel de silice pour que l'équilibre hygrométrique soit à une HR de 50 %.

Selon l'annexe 2, un taux de 27,07 % d'eau (équilibre hygrométrique % g/g poids sec) est nécessaire dans un gel de silice ordinaire pour qu'il soit équilibré à une HR de 50 %. Si l'on commence par 1 000 g de gel de silice sec, on introduit de l'eau jusqu'à ce que le poids du sorbant humide atteigne 1 270,7 g (1 000 x 1,2707).

Une autre manière de déterminer si l'équilibre hygrométrique désiré est atteint est de surveiller la variation de poids du sorbant pendant le conditionnement dans la chambre de conditionnement. On mesure le poids du sorbant tous les deux à trois jours jusqu'à ce qu'il se stabilise. La balance utilisée devrait être suffisamment précise pour détecter une variation de poids dans le sorbant de 0,1 % ou moins.

### Ajout d'un sorbant sec ou d'un sorbant humide pour faciliter l'ajustement du niveau d'humidité du sorbant

L'ajustement du sorbant au niveau d'humidité désiré peut être coûteux en temps. Le processus peut être accéléré si l'on dispose déjà, en plus du lot de sorbant qui doit être ajusté, d'un sorbant sec (HR avoisinant 0 %) et d'un sorbant humide du même type (taux d'HR de 75 % atteint au moyen de NaCl). Un sorbant sec ou humide sera ajouté au lot principal de sorbant afin de l'équilibrer à une HR précise reposant sur les équations suivantes.

Si le sorbant dont on dispose est équilibré à une HR inférieure au niveau désiré, un sorbant humide (SH) devra être ajouté, conformément à l'équation 3.

Équation 3 :

Quantité de SH à ajouter (g) = quantité réelle de sorbant (g) x [HR cible (%) - HR réelle (%) / HR du SH (%) - HR cible (%)]

Exemple : Si le sorbant doit être conditionné pour atteindre un équilibre de 50 % d'HR et que l'on dispose d'une quantité de 1 000 g de sorbant équilibré à une HR de 40 %, un sorbant humide (HR de 75 %) doit être ajouté au mélange comme suit :

- $1\ 000 \times (50 - 40) \div (75 - 50) = 400$  g de sorbant à une HR de 75 %
- 400 g de sorbant humide à une HR de 75 % seront mélangés à 1 000 g de sorbant à une HR de 40 %
- Prendre la quantité requise du mélange de 1 400 g

Si le sorbant utilisé est équilibré à une HR supérieure au niveau désiré, un sorbant sec doit être ajouté, conformément aux équations 4 et 5.

Équation 4 :

Quantité de sorbant réel (g) = HR cible (%) x quantité totale de sorbant cible (g) / HR du sorbant réel (%)

Équation 5 :

Quantité de sorbant sec = quantité totale de sorbant cible - quantité réelle de sorbant

Exemple : Si l'on dispose d'une quantité de 1 000 g de sorbant équilibré à une RH de 60 % (réel) et que l'HR cible est de 40 %.

- Avec l'équation 4 :  $40 \times 1\,000 \div 60 = 667$  g de sorbant à une HR de 60 %
- Avec l'équation 5 :  $1\,000 \text{ g} - 667 \text{ g de sorbant réel (60 \% d'HR)} = 333$  g de sorbant sec
- Bien mélanger le sorbant humide équilibré à 60 % et le sorbant sec

Dans les deux scénarios, il faut vérifier si l'HR générée est proche de l'HR cible. La nouvelle HR générée par les sorbants pourrait ne pas correspondre à l'HR cible la première fois. Cette non-correspondance s'explique par divers facteurs, comme le lien non linéaire entre l'équilibre hygrométrique et l'HR, l'utilisation de sorbant non entièrement sec et l'effet d'hystérésis. Si un ajustement est requis, on utilise l'équation qui correspond à son scénario (sorbant plus humide ou sorbant plus sec) et l'on commence par le dernier mélange de sorbants. Commencer par le mélange le plus récent permettra de réduire l'écart entre l'HR obtenue à partir du mélange et l'HR cible. Lorsque la valeur d'HR générée par le mélange est satisfaisante, on laisse idéalement les sorbants mélangés se stabiliser quelques jours avant de les utiliser comme matériaux tampons dans un contenant de protection. En pratique, toutefois, le mélange peut être utilisé immédiatement, étant donné que l'HR dans le contenant de protection demeure au niveau désiré tandis que les perles atteignent un équilibre.

L'ajout d'un sorbant (sec ou humide) supplémentaire dans le contenant de sorbant placé dans la vitrine d'exposition aux fins d'atteinte de l'HR désirée peut être effectué si l'accès au sorbant est facile et s'il y a suffisamment d'espace pour le sorbant supplémentaire. En fonction du sorbant utilisé, il est aussi possible d'ajouter simplement de l'eau au sorbant tandis qu'il se trouve dans la vitrine. Dans les deux scénarios, le sorbant doit être remué.

#### Fournisseurs

Art-Sorb, la bentonite (Desi Pak), les tamis moléculaires 4A (zéolite), le gel de silice orange, PROSorb, le gel de silice ordinaire et RHapid Gel sont offerts auprès d'entreprises de distribution de produits de conservation :

- [Talas](#) (en anglais seulement)
- [Carr McLean](#) (en anglais seulement)
- [Long Life for Art](#) (en anglais seulement)
- [Keepsafe](#) (en anglais seulement)
- [Art Preservation Services](#) (en anglais seulement)

#### Annexe 1 : Détermination du réservoir d'humidité donné

La détermination du réservoir d'humidité donné est basée sur des données obtenues à partir de l'équilibre hygrométrique (% g/g poids sec) du sorbant à divers taux d'HR (qu'on appelle « isotherme de l'équilibre hygrométrique en fonction de l'HR »). À partir de cette courbe isotherme, on peut calculer la variation dans l'humidité relative à la variation de l'HR.

#### Détermination de l'équilibre hygrométrique

La détermination du pourcentage de l'équilibre hygrométrique (100 x g H<sub>2</sub>O par g de sorbant sec) a été obtenue à l'aide d'un analyseur de sorption, qui est automatiquement exécuté et qui ne nécessite qu'une petite quantité de sorbant. Les courbes d'isotherme des sorbants (comme le montre la figure 2) sont générées à partir des valeurs de gain ou de perte de poids mesurées à divers taux d'HR. Ces résultats ont été obtenus à l'aide de l'analyseur de sorption TGA Q5000 SA de

l'entreprise TA Instruments. Pour chaque échantillon (sorbant) testé, de un à trois granules (poids total d'environ 20 mg) ont été placés dans l'instrument et soumis à une série d'étapes énumérées dans le protocole d'essai suivant :

1. L'échantillon a été conditionné à 20 °C et à une HR de 0 % sous azote pendant 360 minutes.
2. L'HR a été augmentée par tranches de 5 % dans la plage de 0 % à 10 % (l'HR a été augmentée après une variation de poids inférieure à 0,015 % pendant 5 minutes ou une durée maximale de 240 minutes).
3. L'HR a été augmentée par tranches de 10 % dans la plage de 10 % à 60 % (l'HR a été augmentée après une variation de poids inférieure à 0,015 % pendant 5 minutes ou une durée maximale de 400 minutes).
4. L'HR a été diminuée par tranches de 5 % dans la plage de 60 % à 40 % (l'HR a été diminuée après une variation de poids inférieure à 0,015 % pendant 5 minutes ou une durée maximale de 300 minutes).
5. L'HR a été augmentée par tranches de 5 % dans la plage de 40 % à 60 % (l'HR a été augmentée après une variation de poids inférieure à 0,015 % pendant 5 minutes ou une durée maximale de 300 minutes).
6. Les étapes 4 et 5 ont été répétées deux fois de plus, occasionnant trois cycles de variation de l'HR de 40 % à 60 %.
7. L'HR a été diminuée par tranches de 5 % dans la plage de 60 % à 40 % (l'HR a été diminuée après une variation de poids inférieure à 0,015 % pendant 5 minutes ou une durée maximale de 300 minutes).
8. L'HR a été diminuée par tranches de 10 % dans la plage de 40 % à 10 % (l'HR a été diminuée après une variation de poids inférieure à 0,015 % pendant 5 minutes ou une durée maximale de 300 minutes).
9. L'HR a été diminuée par tranches de 5 % dans la plage de 10 % à 0 % (l'HR a été diminuée après une variation de poids inférieure à 0,015 % pendant 5 minutes ou une durée maximale de 240 minutes).
10. L'échantillon a été séché à 60 °C et à une HR de 0 % sous azote pendant 360 minutes.
11. L'échantillon a été équilibré à 20 °C et à une HR de 0 % sous azote pendant 240 minutes.

La durée de l'analyse variait d'un jour et demi à sept jours selon la nature du sorbant. De trois à cinq mesures ont été effectuées sur chaque sorbant selon l'uniformité des perles.

#### Calcul de M et de M<sub>H</sub>

Le réservoir d'humidité donné (M) représente la quantité d'eau (en grammes) qui est gagnée ou perdue par kilogramme de sorbant sec pour chaque variation de 1 % de l'HR. M<sub>H</sub> (pour hystérésis ajustée) est utilisée lorsque les cycles de sorption-désorption se produisent en raison de variations de l'HR. M<sub>H</sub> peut être obtenue en additionnant les valeurs moyennes de M pour la sorption et la désorption.

Par exemple, le tableau 2 montre les variations dans l'équilibre hygrométrique et le poids d'un sorbant (même sorbant que celui de la figure 2) au fil des variations de l'HR.

**Tableau 2 : Cycles d'hystérésis de l'isotherme de l'équilibre hygrométrique en fonction de l'HR pour un échantillon de sorbant donné**

HR (%)	Équilibre hygrométrique (%) (100 x g H <sub>2</sub> O par g de poids sec) à 20 °C	Poids du sorbant conditionné (g)
0	0	0,028530
40	21,90	0,034778
50	26,57	0,036111
60	34,56	0,038390

**Tableau 2 : Cycles d'hystérésis de l'isotherme de l'équilibre hygrométrique en fonction de l'HR pour un échantillon de sorbant donné**

HR (%)	Équilibre hygrométrique (%) (100 x g H <sub>2</sub> O par g de poids sec) à 20 °C	Poids du sorbant conditionné (g)
50	30,29	0,037172
40	21,94	0,034790

Le M<sub>H</sub> pour la plage d'HR de 40 % à 60 % [M<sub>H</sub> (50 % ± 10 %)] avec un point de consigne de 50 % est déterminé comme suit :

$M(\text{de } HR_1 \text{ à } HR_2) = \text{gain (ou perte) d'eau (g) par kg de sorbant sec à l'HR}_1 \div [HR_2 (\%) - HR_1 (\%)]$

Sorption  $M(\text{de } HR_1 \text{ à } HR_2) = [(poids \text{ à } HR_2 - poids \text{ à } HR_1) \times (1\,000 \text{ g/1 kg}) \div poids \text{ à } HR \text{ de } 0\%] \div [HR_2 - HR_1]$

Sorption  $M(\text{de } 50\% \text{ à } 60\%) = [(0,038390 \text{ g} - 0,036111 \text{ g}) \times (1\,000 \text{ g/1 kg}) \div 0,028530 \text{ g}] \div [de\ 60\% - 50\%] = 7,99 \text{ g/kg}$   
pour une variation de 1 % de l'HR (hausse)

Désorption  $M(\text{de } 60\% \text{ à } 50\%) = [(0,037172 \text{ g} - 0,038390 \text{ g}) \times (1\,000 \text{ g/1 kg}) \div 0,028530 \text{ g}] \div [de\ 50\% - 60\%] = 4,27 \text{ g/kg}$   
pour une variation de 1 % de l'HR (baisse)

M<sub>H</sub> (50 % ± 10 %) sera la moyenne de M(de 40 % à 50 %), de M(de 50 % à 60 %), de M(de 60 % à 50 %) et de M(de 50 % à 40 %) = 6,32 g/kg pour une variation de 1 % de l'HR du sorbant sec

#### Annexe 2 : Équilibre hygrométrique

L'équilibre hygrométrique pour divers sorbants étudiés est présenté dans le tableau 3. La connaissance de ces valeurs est essentielle pour le conditionnement des sorbants en ce qui concerne l'HR précise requise. Les données sont utilisées dans la section [Mesure du poids du sorbant](#).

**Tableau 3 : Équilibre hygrométrique de divers sorbants**

HR (en %)	Équilibre hygrométrique (%) du sorbant, de l'état sec à l'état humide à 20 °C				
	RHapid Gel	PROsorb	Art-Sorb	Gel de silice ordinaire (incolore)	Gel de silice orange
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	3,55	3,46	5,50	4,96	4,45
20	7,43	7,14	8,57	10,00	8,94
30	11,92	11,51	11,41	15,48	13,86
40	17,66	16,97	14,49	21,09	19,10
50	25,32	23,63	18,37	27,07	24,14
60	34,46	31,43	23,93	31,46	27,28



## Bibliographie

- 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.
- 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.
- Greenspan, L. « [Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions](#) » (format PDF) (en anglais seulement), *Journal of Research of the National Bureau of Standards, A. Physics and Chemistry*, vol. 81A (1977), p. 89-96.
- Lafontaine, R. H. *Gel de silice*, Bulletin technique 10, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 1984.
- Padfield, T. « The Control of Relative Humidity and Air Pollution in Showcases and Picture Frames », *Studies in Conservation*, vol. 11 (1966), p. 8-30.
- Tétrault, 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.
- U.S. National Park Service. [Using Silica Gel in Microenvironments](#) (format PDF) (en anglais seulement), Conserve O Gram 1/8, Washington (D.C.), U.S. National Park Service, 1999.
- Weintraub, S. « Demystifying Silica Gel », dans *Proceedings of the Objects Specialty Group Session, 30th AIC Annual Meeting, Miami, 10 June 2002: Objects Specialty Group Postprints*, vol. 9, Washington (D.C.), American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 2002, p. 169-194.
- © Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation, 2018

Publié par :

Institut canadien de conservation

Ministère du Patrimoine canadien

1030, chemin Innes

Ottawa (Ontario) K1B 4S7

Canada

N° de catalogue : CH57-3/1-33-2018F-PDF

ISSN 0706-4160

ISBN 978-0-660-24286-6

[Text also available in English.](#)