



Patrimoine
canadien

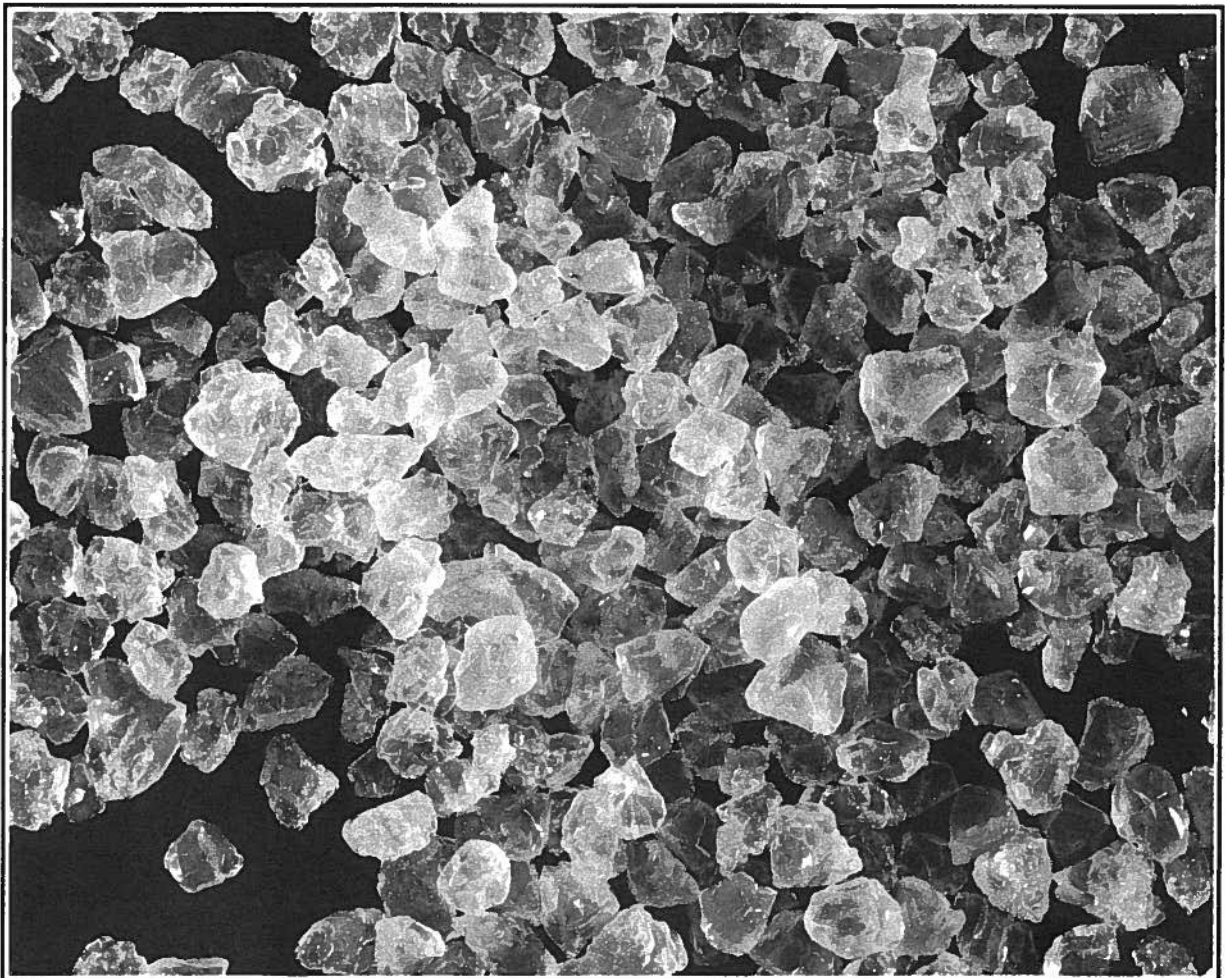
Canadian
Heritage

Institut
canadien de
conservation

Canadian
Conservation
Institute

Bulletin technique **10**

Le gel de silice



Canada

BULLETIN TECHNIQUE N° 10

Le gel de silice

Raymond H. Lafontaine

Publié par l'Institut canadien de conservation (ICC)
1030 chemin Innes
Ottawa, Canada
K1A 0M8

ISSN 0706-4152
ISBN 0-662-53370-4
DSS Cat. N° NM 95-55/10-1984
Octobre 1984

Résumé

Le présent bulletin technique porte sur l'emploi du gel de silice, son action régulatrice sur l'humidité relative, la manière dont il est conditionné pour l'utilisation et conservé. On expose notamment les problèmes que posent les fuites dans les vitrines, le rôle d'un agent tampon pour la régulation de l'humidité, la façon dont le gel de silice remplit ce rôle, diverses étapes de son conditionnement, la façon de l'appliquer dans une vitrine et l'entretien d'une vitrine ainsi tamponnée.

Auteur

Raymond H. Lafontaine est Chef de la Division de la Recherche sur le milieu et la détérioration à l'Institut canadien de conservation. Il a étudié la chimie à l'Université d'Ottawa, où il a obtenu en 1972 un baccalauréat en sciences. Il est entré la même année à l'Institut canadien de conservation. Il y étudie présentement les effets de la lumière et de l'humidité relative sur les objets et il s'intéresse tout particulièrement au développement de techniques pour réduire la détérioration de ces objets.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE

1.	Introduction	1
2.	Les fuites dans les vitrines	1
3.	Agents tampons pour l'humidité relative	2
4.	Le gel de silice	3
5.	Le conditionnement du gel de silice	4
6.	Comment placer le gel de silice dans une vitrine	10
7.	Régulation de l'humidité relative dans une vitrine tamponnée au gel de silice	11
	Annexe 1	13
	Annexe 2	14
	Annexe 3	16

1. INTRODUCTION

Les conservateurs et restaurateurs du monde entier savent que la préservation des objets dont ils ont la garde exige des conditions sûres, contrôlées et constantes : éclairage modéré, température stable et niveau constant d'humidité relative (H.R.). De ces trois éléments, c'est le dernier qui est souvent le plus difficile à régulariser. Pour y parvenir, on a généralement recours à une vitrine contenant du gel de silice. Les petits musées n'ont parfois qu'une seule de ces vitrines pour leur objet le plus important, mais les grands musées en ont souvent de nombreuses.

Bien que l'usage du gel de silice dans les vitrines soit très répandu, le personnel des musées n'est pas toujours au fait de la façon de préparer ou de conditionner ce produit, puis de l'entretenir. Plus grave encore, dans bien des cas il ne voit pas la nécessité de ces opérations.

En raison de ses propriétés chimiques, le gel de silice peut servir à la fois de dessiccant pour éliminer l'humidité de l'air et d'agent tampon pour maintenir l'humidité relative à un niveau constant ou la ramener au niveau souhaité. Dans les deux cas, il doit être conditionné avant usage. Par exemple, s'il est employé comme dessiccant (c'est le cas des petits sachets que l'on trouve dans les emballages d'éléments stéréo), il doit d'abord être séché avant de pouvoir absorber l'humidité du milieu extérieur. Si par ailleurs il est employé dans les vitrines de musées comme agent tampon, il doit être conditionné par les méthodes appropriées, que l'on trouvera décrites dans le présent bulletin.

Le présent bulletin technique a pour objet d'expliquer le mode d'emploi du gel de silice, la façon dont ce produit régularise l'humidité relative et la manière de le conditionner avant et pendant l'emploi. On y trouvera notamment exposés le problème des fuites dans les vitrines, les caractéristiques que doit posséder un agent tampon comme le gel de silice, les diverses étapes à suivre pour conditionner ce produit, la façon de placer le gel dans la vitrine, et enfin l'entretien d'une vitrine au gel de silice. Le texte est accompagné des équations et des calculs mathématiques indispensables afin de déterminer les quantités nécessaires de gel et d'eau. (Voir l'annexe 3.) Les musées qui ne disposent pas de l'équipement voulu (four, balances...) pour traiter le gel de silice pourront sans doute profiter des installations de laboratoires de l'école secondaire la plus proche.

2. LES FUITES DANS LES VITRINES

Avant de parler du gel de silice même, disons quelques mots des fuites dans les vitrines. Ces dernières sont faites normalement de plexiglas et reposent sur une base en bois. Si bien fermée qu'elle soit, aucune vitrine de musée n'est

parfaitement étanche ; même les mieux conçues laissent passer un peu d'air. Le passage de l'air et de l'humidité de l'intérieur à l'extérieur de la vitrine, et inversement, s'effectue principalement par les fêlures et les imperfections des joints. Prenons par exemple une vitrine bien conçue, conditionnée à une H.R. de 50 % mais placée dans une pièce dont l'H.R. est de 15 % ; à l'intérieur, l'H.R. diminuera graduellement, jusqu'à ce qu'elle atteigne 15 %. Le même genre de phénomène se produit dans une maison dont on arrête le chauffage en hiver : la température intérieure baisse peu à peu. Seulement, si la maison est bien étanche et bien isolée, la chute sera lente. On peut faire la même comparaison entre les vitrines bien étanches et celles qui ont des fuites. Dans les deux cas, on finit par atteindre un point d'équilibre avec l'extérieur.

Le passage de l'humidité de l'intérieur de la vitrine à l'extérieur (ou l'inverse si l'humidité relative est plus élevée à l'extérieur) obéit à une loi exponentielle : il est rapide au début, mais ralentit avec le temps. La figure 1 montre comment l'H.R., qui était de 50 % au début à l'intérieur d'une vitrine placée dans une pièce à H.R. de 15 %, peut changer avec le temps. De 50 % au point A, elle baisse jusqu'à dépasser à peine les 15 % de la pièce, au point B, après environ 24 heures. On pourrait dire aussi que l'air qui se trouvait à l'intérieur de la vitrine a été remplacé par de l'air extérieur après une certaine période. Ainsi, cette vitrine pourrait connaître un changement d'air complet par jour ; il arrive toutefois que les vitrines de musées subissent quotidiennement plusieurs répétitions de ce phénomène. (Cette explication par le nombre de changements d'air est une façon simplifiée de décrire le taux de changement exponentiel, en réalité plus complexe ; les ingénieurs s'en servent souvent lorsqu'ils parlent de climatisation des édifices.)

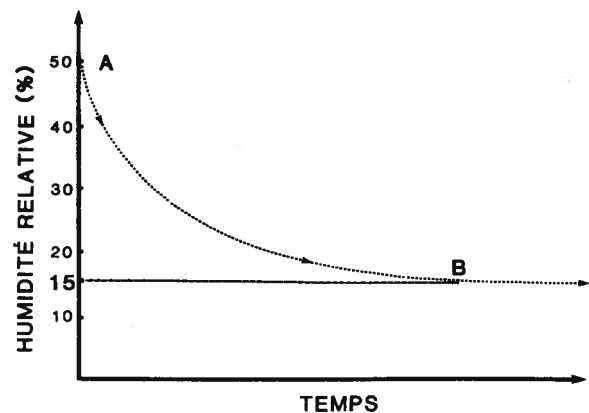


Figure 1 : Graphique montrant la diminution exponentielle de l'humidité relative à l'intérieur d'une vitrine initialement à 50 % (A), située dans une pièce dont l'H.R. est de 15 %.

Le nombre de changements d'air peut être porté à un seul environ toutes les 24 heures grâce à une bonne utilisation des composés de scellement, associée à des joints

efficaces et à des portes d'accès bien ajustées ; il est difficile de faire mieux. L'emploi d'une bonne vitrine, sans aucune autre forme de protection, minimiserait sans doute les fluctuations rapides de l'humidité relative, pourvu qu'on revienne à la normale après deux ou trois heures ; cependant, tout changement durable de l'humidité extérieure finirait par se faire sentir à l'intérieur de la vitrine au bout de quelques jours. Pour illustrer cet effet, la figure 2 montre les conditions théoriques d'humidité à l'intérieur et à l'extérieur d'une vitrine. Les deux fluctuations rapides de H.R. marquées A ne sont pas aussi importantes à l'intérieur qu'à l'extérieur de la vitrine, à cause de l'étanchéité relative de celle-ci. Toutefois, si l'humidité extérieure reste faible assez longtemps, comme l'indique la section de la courbe marquée B, l'humidité intérieure finira par se retrouver au même niveau. Cette situation se produit dans de nombreuses régions du Canada qui connaissent une faible humidité relative une grande partie de l'hiver. (C'est d'ailleurs l'inverse en été.)

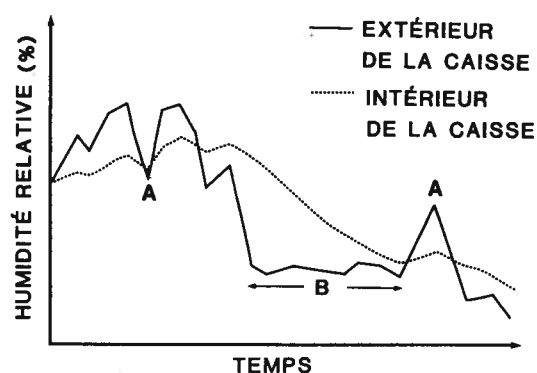


Figure 2 : Une vitrine bien scellée ne réagit pas tellement aux fluctuations rapides de l'H.R. extérieure, mais elle en suit les conditions moyennes.

Pour obtenir une meilleure régulation de l'H.R. à l'intérieur des vitrines, il faut adopter une méthode qui permette d'élever ou d'abaisser l'humidité au besoin. On peut recourir à des moyens mécaniques, mais ce serait trop coûteux pour une seule vitrine. Par contre, il existe des techniques non mécaniques qui font appel à un produit tampon comme le gel de silice ; c'est là le moyen le plus probant et le plus fréquemment utilisé.

3. AGENTS TAMPONS POUR L'HUMIDITÉ RELATIVE

Le Petit Robert définit un *tampon* comme «ce qui amortit les chocs, empêche les heurts (dans un sens concret ou abstrait)». Dans le domaine qui nous intéresse, le mot *tampon* a un sens similaire : c'est une substance employée pour minimiser les changements d'humidité relative d'un volume d'air donné en raison des variations climatiques extérieures.

De nombreuses substances contiennent une certaine quantité d'eau, déterminée par le degré d'humidité relative de l'air ambiant. Pour une H.R. donnée, une substance a une teneur précise et spécifique en humidité ; on dit alors qu'elle est en équilibre dans le milieu (voir annexe 1 : Effets de l'hystérésis et de la température sur les courbes de la T.H.E. en fonction de l'H.R.). La teneur en humidité à l'équilibre (T.H.E.) d'une substance est le rapport de la masse d'eau qu'elle contient à la masse sèche de la substance, et on l'exprime en pourcentage. Normalement, on trace une courbe de la T.H.E. en fonction de l'H.R. et, pour chaque H.R., une substance a une teneur correspondante en humidité à l'équilibre.

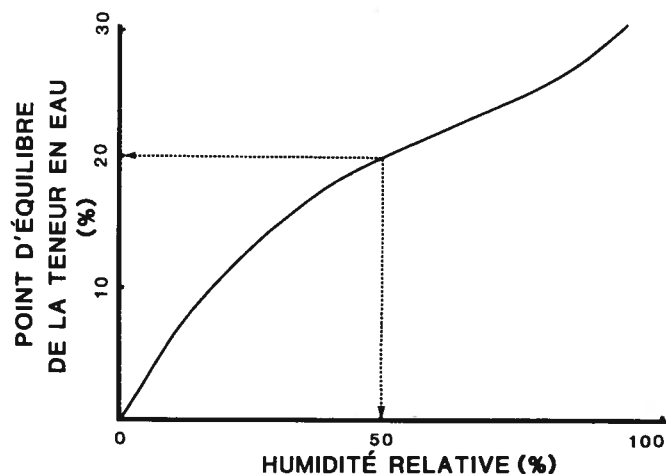


Figure 3 : Courbe typique de la teneur en humidité à l'équilibre (T.H.E.) en fonction de l'humidité relative (H.R.).

À la figure 3, par exemple, la substance qui fait l'objet de la courbe de la T.H.E. en fonction de l'H.R. contient 20 % d'eau à une H.R. de 50 %, et se trouve donc en équilibre. Si, pour une raison quelconque, sa teneur en humidité était de 22 % au lieu de 20 % à une H.R. de 50 %, elle ne serait pas en équilibre, et libérerait de l'eau dans l'air ambiant jusqu'à ce qu'elle atteigne son point d'équilibre sur la courbe, c'est-à-dire 20 %. Inversement, si sa teneur en humidité avait été de 18 %, elle aurait absorbé de l'eau contenue dans l'air pour atteindre 20 %. Ce mécanisme est à la base de l'action tampon des substances comme le gel de silice ; il nous procure un moyen d'élever l'humidité d'un volume d'air trop sec ou d'abaisser l'humidité d'un air trop humide. Ainsi, en plaçant une certaine quantité de produit tampon dans une vitrine, nous pouvons dans une certaine mesure régulariser l'humidité relative intérieure. L'annexe 2 contient une explication complète du mécanisme et de ses différents paramètres.

La capacité d'absorption d'humidité des substances varie considérablement, de sorte qu'on ne peut pas toutes les utiliser comme tampon. Un bon agent tampon doit avoir les caractéristiques suivantes :

TABEAU 1
MASSES VOLUMIQUES DE DIVERSES QUALITÉS DE GEL DE SILICE

Qualité	Maille	Masse volumique (kg/L)	Type
01	3-8	0,64	non indicateur
40	6-12	0,63	non indicateur
03	sur 8	0,68	non indicateur
41	3-9	0,69	non indicateur
59	3-8	0,36	non décrépitant
42	6-16	0,67	indicateur
407	8-20	0,68	non indicateur
43	14-20	0,70	indicateur

1. Il doit avoir une excellente capacité d'absorption et de libération d'eau. (De telles substances ont une teneur en humidité relativement élevée près de l'H.R. désirée : la courbe de la T.H.E. en fonction de l'H.R. présente donc une pente forte et linéaire près de l'H.R. désirée, de sorte que des changements importants de la T.H.E. correspondent à des changements plus faibles de l'H.R.)
2. Il doit présenter une grande surface pour que le tamponnage s'effectue rapidement.
3. Il ne doit pas subir de dégradation physique lorsqu'il absorbe ou libère de l'humidité.
4. Il doit rester sec au toucher, même lorsqu'il a une forte teneur en humidité.
5. Il doit pouvoir être conditionné facilement et être réutilisable.

4. LE GEL DE SILICE

Le gel de silice remplit toutes ces conditions. Il s'agit d'une forme de silice poreuse, granulaire et non cristalline qui contient 99,7 % de silice pure. C'est un produit chimiquement inerte, non toxique, non déliquescent, stable du point de vue dimensionnel et non corrosif. Il est compatible avec la majorité des matériaux, à l'exception des bases fortes et de l'acide fluorhydrique.

Il existe dans le commerce plus de 25 qualités de gel de silice granulaire. Les différences portent sur la granulométrie, les caractéristiques d'absorption et la pureté. Certains types sont pourvus d'indicateurs de la teneur en humidité (tableau 1).

Les qualités de gel de silice mentionnées dans le présent bulletin technique (à l'exception de la qualité 59) sont toutes acceptables pour l'emploi dans les vitrines. La qualité 59 est un produit spécial qui a une efficacité très

réduite (ce gel ne se fêle pas lorsqu'il entre en contact avec l'eau) ; elle ne doit être utilisée dans les vitrines qu'en combinaison avec d'autres qualités¹. Le taux d'absorption et de désorption ne varie pas de façon significative d'une qualité à l'autre pour les qualités qui figurent au tableau 1 (à l'exception de la qualité 59). Certaines qualités de gel de silice ont des revêtements colorés spéciaux qui indiquent si le gel est sec et activé (couleur bleue) ou s'il a absorbé de l'eau et perdu ses qualités de dessiccantif (couleur rose), auquel cas il faut le réactiver. Ces gels de silice avec indicateur ont les mêmes propriétés d'agents tampons que les gels ordinaires.

Bien que le gel ne soit pas toxique, il peut produire une fine poussière de silice lorsqu'on le transvase. Lorsqu'on le manipule, il faut donc porter un masque antipoussière du genre de ceux que l'on vend dans les quincailleries pour la peinture au pistolet.

Le gel de silice est vendu par la plupart des fournisseurs de matériel de laboratoire et de produits chimiques. Lors de la commande, il importe de préciser la qualité et la granulométrie requises. Par exemple, il existe un gel de



Figure 4 : Le gel de silice, solide granulaire, se vend en contenants de tailles diverses, allant de la bouteille de 500 g au baril de 70 kg.

¹ Steven Weintraub, «A New Design for a Low Maintenance Silica Gel System for the Control of Relative Humidity in a Sealed Case», dans Vienna Congress, *Conservation Within Historic Buildings*, textes préparés par N.S. Bromelle, Garry Thomson et Perry Smith (Londres, The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1980), 55-57.

silice très fin pour la chromatographie, mais ce type ne convient pas pour le tamponnage des vitrines (figure 4).

Le gel de silice peut se conserver quasi indéfiniment. Par conséquent, on peut s'en procurer une bonne quantité sans craindre de le voir se perdre. Le coût du produit varie d'une qualité à l'autre et dépend de la quantité achetée.

Dans l'industrie, on utilise surtout le gel de silice comme dessiccatif, c'est-à-dire comme agent desséchant. C'est pour cette raison qu'il est presque toujours expédié sous une forme sèche dite active. Si l'on plaçait ce gel de silice sec dans une vitrine, on obtiendrait une dessiccation complète de l'air et des objets qui se trouvent à l'intérieur. En conséquence, *le gel de silice doit être conditionné pour l'humidité relative désirée*. C'est seulement dans les vitrines contenant certains objets métalliques que l'on utilisera le gel de silice sous la forme où il est reçu.

5. LE CONDITIONNEMENT DU GEL DE SILICE

Le conditionnement du gel de silice consiste à lui faire absorber de l'humidité jusqu'à ce qu'il atteigne la teneur en humidité à l'équilibre équivalente à l'humidité relative désirée. En effet, pour maintenir une humidité relative donnée dans une vitrine, le gel de silice doit avoir une teneur en humidité équivalente à sa teneur en humidité à l'équilibre à cette H.R. Cette valeur est obtenue à partir de la courbe de la T.H.E. en fonction de l'H.R. pour ce type particulier de gel de silice. Les figures 5 et 6 présentent les courbes relatives à huit qualités courantes de gel de silice, dressées conformément aux mesures effectuées par l'Institut canadien de conservation. D'un lot à un autre on peut s'attendre à certains écarts par rapport à ces courbes, mais pour la plupart des applications ils ne seront pas significatifs.

On conditionne le gel de silice en quatre étapes : il faut d'abord le sécher, puis déterminer la quantité requise, le peser, et enfin lui faire absorber de l'humidité.

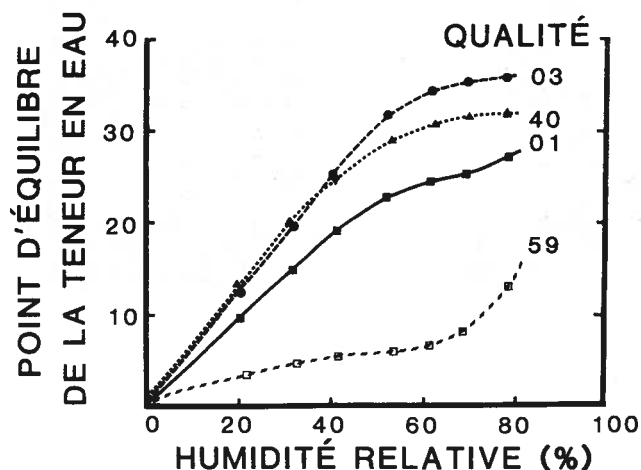


Figure 5: Courbes de la T.H.E. en fonction d'H.R. pour différentes qualités de gel de silice.

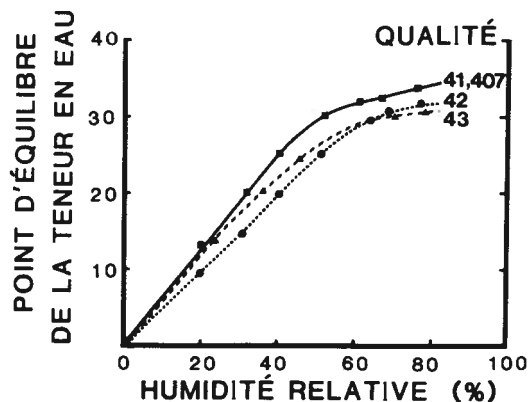


Figure 6: Courbes de la T.H.E. en fonction d'H.R. pour différentes qualités de gel de silice.

5.1 Le séchage du gel de silice

La première étape du conditionnement est le séchage du gel ; en effet, bien qu'il soit expédié à l'état sec, il peut tout de même contenir un petit pourcentage d'eau. Comme, pour beaucoup de calculs, il est nécessaire de connaître la masse sèche exacte, nous recommandons de sécher complètement le gel avant de le peser. Pour cela, on le place dans des récipients peu profonds sur une épaisseur d'environ 2 cm, et on le chauffe dans une étuve (120 °C) pendant 12 heures ou plus (figure 7). Les fours de cuisine sont tout à fait acceptables ; par contre, les incubateurs ne conviennent pas, car normalement leur température n'est pas assez élevée. Les fours à micro-ondes n'ont pas été testés, mais ne conviennent probablement pas. Une fois que le gel est desséché, on le place aussitôt dans des contenants en métal que l'on ferme hermétiquement (figure 8 ; la plupart des quincailleries peuvent fournir des contenants de peinture qui sont parfaits pour cet usage). Il faut laisser le gel reposer quelques heures avant de le peser.



Figure 7: Le gel de silice peut être séché par chauffage dans un four à 120 °C pendant 12 heures.



Figure 8 : Le gel de silice chaud est placé dans un contenant métallique que l'on ferme hermétiquement.

5.2 Quantité de gel requise

La quantité de gel de silice conditionné que l'on place dans une vitrine est très importante : c'est d'elle que dépend le maintien du niveau voulu d'humidité relative sur des périodes prolongées. Si l'on met trop peu de gel de silice, on n'obtiendra pas une efficacité suffisante pour neutraliser les variations sur une longue période. Si l'on en met trop, il faudra prévoir plus d'espace dans la vitrine, ce qui ajoute au coût du système. Pour une vitrine assez étanche, il faut environ 20 kg de gel de silice conditionné par mètre cube². Si l'on suit cette recommandation, on pourra préserver à l'intérieur de la vitrine une H.R. de 35 à 65 %, même par temps très sec ou très humide. Supposons par exemple que nous avons une petite vitrine dont l'humidité doit être maintenue à 50 %. Le volume total de la vitrine, y compris l'espace situé au-dessous du faux fond (voir section 6), est de 0,3 m³.

On calcule la quantité approximative de gel nécessaire, en kilogramme, en multipliant le volume de la vitrine en mètres cubes par 20. Pour notre petite vitrine, cela donnerait 20 × 0,3 m³ ou 6,0 kg. Ensuite nous devons déterminer la T.H.E. de la qualité particulière de gel de silice que nous utiliserons (supposons qu'il s'agit de la qualité 01) à une H.R. de 50 %. D'après la figure 5, le gel de silice de qualité 01 a une T.H.E. de 23 % à une H.R. de 50 %. Nous pouvons maintenant déterminer la quantité de gel de silice sec dont nous avons besoin au moyen de la formule suivante:

$$\begin{aligned}
 &\text{Masse de gel sec} \\
 &= \frac{\text{masse de gel conditionné (kg)}}{1 + \text{T.H.E.}} \\
 &= \frac{6,0}{1 + 0,23} \\
 &= 4,9 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Une fois que l'on connaît exactement la masse de gel de silice nécessaire, on peut en calculer le volume réel au moyen des masses volumiques figurant au tableau 1. Par exemple, le volume de 4,9 kg de gel de silice de qualité 40 se calcule de la façon suivante:

$$\begin{aligned}
 &\text{Volume} \\
 &= \frac{\text{masse de gel (kg)}}{\text{masse volumique du gel (kg/L)}} \\
 &= \frac{4,9}{0,63} \\
 &= 7,8 \text{ L}
 \end{aligned}$$

5.3 Comment peser le gel de silice

Pour le conditionnement, le gel de silice sec et refroidi peut être placé dans un plateau muni d'un tamis (figure 9), ou encore dans des sacs faits d'une fibre textile très perméable et résistante à la chaleur, comme le polyester employé en sérigraphie (figure 10). La dimension des sacs dépend de celles de la vitrine et de la quantité du gel. Si l'on se sert de gel en vrac, il vaut mieux tarer le plateau à tamis avant de commencer. Cela élimine la nécessité de transférer le gel de silice du tamis à un autre contenant pour la pesée. Comme le gel est plus facile à manipuler et à réutiliser si l'on emploie des sacs, les instructions qui suivent supposent que l'on a adopté cette façon de faire.

Il faut peser le sac vide et en indiquer la masse sur une étiquette jointe (figure 11). Le gel de silice sec et refroidi est versé dans le sac et pesé immédiatement (si l'on ne dispose pas d'une balance de laboratoire, on peut utiliser un pèse-bébé ou une balance postale), puis on ferme le sac par quelques points de couture. La masse sèche doit être clairement indiquée sur l'étiquette. Les sacs de gel de silice peuvent être réutilisés quasi indéfiniment sans qu'il soit nécessaire de les réactiver dans un four pour en calculer la masse sèche.

² Garry Thomson, «Stabilization of RH in Exhibition Cases: Hygrometric Half-Time», dans *Studies in Conservation*, textes préparés par John S. Mills, vol. 21-22 (Londres, The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1977), 85-102.



Figure 9 : Une quantité connue de gel de silice sec est versée dans le plateau de conditionnement. Ce plateau a été taré, ce qui évite d'avoir à retirer le gel pour surveiller l'augmentation de masse. On pèse alors l'ensemble, et la masse du gel de silice est calculée en soustrayant la tare du plateau de la masse totale.

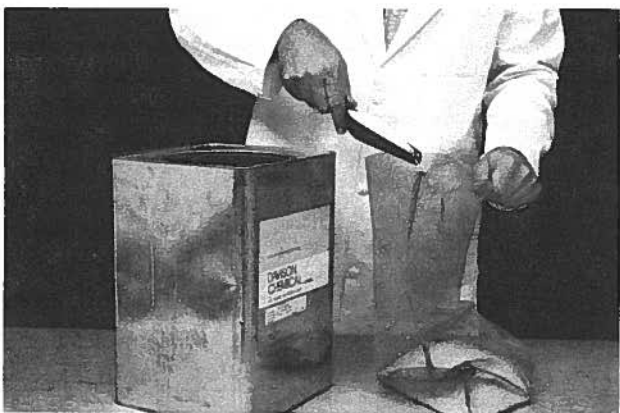


Figure 10 : Le gel de silice sec est versé dans un sac taré, et l'on note la masse totale. Le sac est ensuite fermé pour le conditionnement.

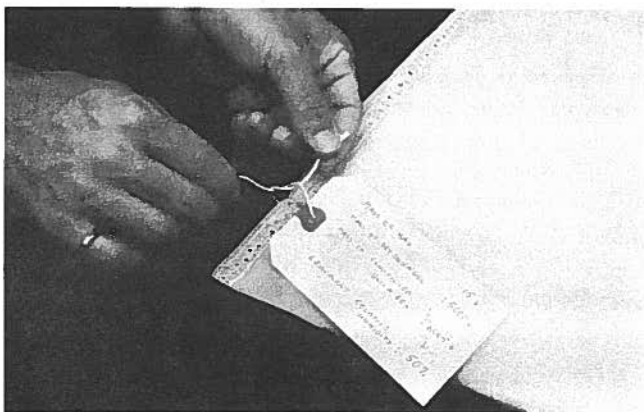


Figure 11 : L'étiquette fixée au sac de gel de silice indique la masse du sac vide, la masse du gel de silice sec et la masse totale.

5.4 Comment faire absorber de l'humidité au gel de silice

L'étape suivante du conditionnement consiste à faire absorber de l'humidité au gel de silice jusqu'à ce qu'il atteigne la teneur en humidité correspondant au niveau requis. **NE JAMAIS VERSER DE L'EAU DIRECTEMENT SUR LE GEL DE SILICE.**

Il y a plusieurs façons de procéder : on peut utiliser une enceinte à humidité contrôlée que l'on trouve dans le commerce, une enceinte de conditionnement contenant de l'eau ou des solutions de sel, une méthode de mélange à sec ou une méthode à air forcé. Selon la première méthode, on place les sacs ou les plats de gel dans une enceinte où l'H.R. est maintenue au niveau souhaité. On pèse le gel tous les deux ou trois jours jusqu'à ce que sa masse ait atteint un équilibre. Il faut habituellement un minimum d'une semaine pour que l'humidité soit entièrement absorbée. C'est là une méthode très pratique, mais c'est aussi la plus coûteuse étant donné le prix des enceintes à humidité contrôlée.

Les deux méthodes qui suivent (où l'on se sert d'eau ou de solutions de sel dans une enceinte de conditionnement) sont beaucoup moins coûteuses et tout aussi efficaces. Elles exigent toutes deux la construction d'une enceinte de conditionnement assez étanche, faite d'un matériau comme le plexiglas. La base est en contreplaqué revêtu de deux couches d'une peinture de bonne qualité, qui en assurent l'étanchéité. Un plat de conditionnement peu profond couvre au moins la moitié de la surface de cette base. Le gel de silice repose dans un plateau à tamis, au-dessus du plat de conditionnement (figures 9 et 12). Un coupe-bise placé entre la base et le plexiglas donne une étanchéité suffisante. Il est souvent utile de se servir d'un hygromètre pour contrôler l'humidité relative à l'intérieur de l'enceinte.

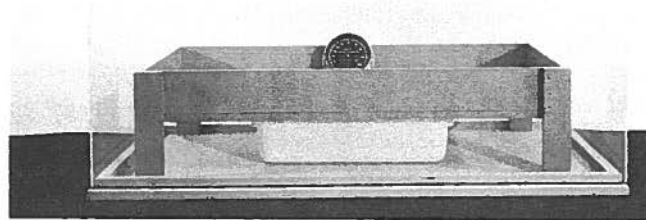


Figure 12 : Système de conditionnement. L'hygromètre indique l'humidité relative à l'intérieur de l'enceinte.

Méthode faisant appel à des solutions de sel dans une enceinte de conditionnement

Selon cette méthode, on se sert de solutions saturées de sel pour obtenir l'humidité requise dans l'enceinte de conditionnement ; le gel de silice est préparé de manière à

TABLEAU 2
COMPOSÉS ACCOMPAGNÉS DE LEUR POURCENTAGE CORRESPONDANT D'HUMIDITÉ
RELATIVE AU-DESSUS DE LA SOLUTION SATURÉE

Température (°C)	HUMIDITÉ RELATIVE %					
	LiCl•H ₂ O	MgCl ₂ •6H ₂ O	Na ₂ Cr ₂ O ₇ •2H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ •6H ₂ O	NaCl	Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O
10	13,3	34,2	57,9	57,8	75,2	
15	12,8	33,9	56,6	56,3	75,3	
20*	12,4	33,6	55,2	54,9	75,5	55,0
25	12,0	33,2	53,8	53,4	75,8	51,0
30	11,8	32,8	52,5	52,0	75,6	

*température approximative de la pièce

Quantité approximative de sel à ajouter à un litre d'eau pour produire une solution saturée à la température de la pièce :

LiCl•H ₂ O—hydrate de chlorure de lithium	0,85 kg (LiCl•H ₂ O)
MgCl ₂ •6H ₂ O—hexahydrate de chlorure de magnésium	3,7 kg (MgCl ₂ •6H ₂ O)
Na ₂ Cr ₂ O ₇ •2H ₂ O—dihydrate de bichromate de sodium	2,9 kg (Na ₂ Cr ₂ O ₇ •2H ₂ O)
Mg(NO ₃) ₂ •6H ₂ O—hexahydrate de nitrate de magnésium	2,5 kg (Mg(NO ₃) ₂ •6H ₂ O)
NaCl—chlorure de sodium	0,38 kg (NaCl)
Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O—tétrahydrate de nitrate de calcium	6,5 kg (Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O)

maintenir l'H.R. au niveau produit au-dessus de la solution. Le tableau 2 donne une liste de plusieurs composés et de leur pourcentage d'humidité relative.

On choisira un composé permettant de maintenir dans l'enceinte l'humidité la plus proche de celle que l'on désire. Pour notre exemple d'une petite vitrine où il faut préserver une H.R. de 50 %, le nitrate de magnésium hydraté [Mg(NO₃)₂•6H₂O] serait le plus près à 54,9 % (température de la pièce : 20 °C). Avec cette méthode, il n'est pas nécessaire de calculer la quantité d'eau absorbée par le gel au cours du conditionnement.

La solution saturée de sel se prépare de la façon suivante : dans la quantité d'eau nécessaire, verser lentement le sel en agitant constamment, jusqu'à ce que l'eau n'en dissolve plus (figure 13). Il faut prendre garde, car dans certains cas ce processus dégage de la chaleur et la solution devient passablement chaude. Laisser reposer pendant une heure, puis ajouter encore du sel jusqu'à ce que des cristaux demeurent visibles. Garder la solution dans un contenant en verre fermé jusqu'au moment de s'en servir.

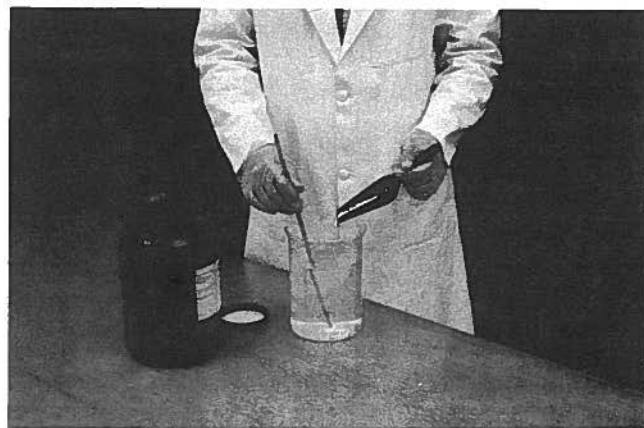


Figure 13 : Préparation d'une solution saturée de sel. Un thermomètre servant à surveiller la température de la solution est fixé au côté du vase.

Le plat de conditionnement recevra la solution sur une hauteur d'environ 2 cm. (Celle-ci doit aussi contenir des cristaux non dissous.) Dans l'enceinte de conditionnement, placer sur la base le plat contenant la solution saturée de sel, et au-dessus le plateau à tamis supportant le gel de silice, en vrac ou en sacs. Sceller l'enceinte et laisser le gel absorber l'humidité pendant au moins une semaine. Peser le gel de silice pour s'assurer que le processus de conditionnement est terminé, c'est-à-dire que la masse a cessé de changer. Étant donné que le gel absorbe une partie de l'eau de la solution saturée, il y aura peut-être lieu d'ajouter de petites quantités d'eau à la solution pour éviter qu'elle ne se dessèche entièrement. Il doit cependant toujours s'y trouver des cristaux non dissous.

Méthode utilisant de l'eau dans une enceinte de conditionnement

Cette méthode est moins coûteuse que la précédente. Pour conditionner le gel de silice nécessaire à la petite vitrine que nous avons déjà prise en exemple, il faut d'abord 4,9 kg de gel sec, en vrac ou en sac. Pour notre propos, nous supposons que l'on utilise un sac (pesant 15 g lorsqu'il est vide). La quantité d'humidité que nous devons ajouter au gel se calcule de la façon suivante :

Masse d'eau nécessaire

$$\begin{aligned} &= \text{T.H.E.} \times \text{masse du gel de silice sec (kg)} \\ &= 0,23 \times 4,9 \\ &= 1,1 \text{ kg (1,1 L d'eau)} \end{aligned}$$

Comme la masse du sac représente moins de 1 % de celle du gel à ensacher, on peut en faire abstraction dans les calculs suivants. La masse totale du sac et du gel conditionné sera par conséquent de

$$4,9 \text{ kg (gel)} + 1,1 \text{ kg (eau)} = 6,0 \text{ kg}$$

Utiliser l'enceinte de conditionnement que nous avons déjà décrite ; placer 1,1 L d'eau (au lieu d'une solution de sel) dans le plat sous le tamis portant le gel de silice ensaché, et fermer l'enceinte. Une fois que l'eau s'est entièrement évaporée (ce qui prend au moins une semaine), il faut retirer le gel de silice et le peser (on peut placer un petit ventilateur près du plat d'eau pour accélérer l'évaporation, qui pourra alors se faire en une journée au lieu d'une semaine). Le sac devrait finalement peser 6,0 kg. En raison des fuites, il est peu probable que le gel absorbe toute l'eau. Si par exemple la masse du gel n'est que de 5,9 kg, il faut encore 0,2 kg (0,2 L) d'eau. On répète donc l'opération en mettant seulement 0,2 kg d'eau dans le plat. Il faut recommencer jusqu'à ce que la masse finale soit en deçà de 1 % de la masse souhaitée, ou qu'elle s'en rapproche le plus possible selon la balance dont on dispose. Dans notre exemple, la marge est de $6 \pm 0,06$ kg, soit entre 5,9 kg et 6,1 kg.

Pour vérifier que les calculs ont été faits correctement et que l'on a bien suivi les instructions, on mesurera l'humidité relative dans l'enceinte contenant le gel de silice conditionné. Se servir pour cela d'un psychromètre à moteur ou d'un thermohygrographe ou hygromètre étalonné (ces instruments doivent être étalonnés avec précision). Normalement, la différence entre l'H.R. calculée et l'H.R. réelle est minime. D'un lot à l'autre, cependant, les variations de la T.H.E. peuvent produire des différences légèrement plus grandes. Si l'H.R. réelle présente un écart de plus de 10 % par rapport à l'H.R. calculée, il est fort possible qu'il y ait eu erreur dans la pesée ou le calcul des quantités.

Méthode de mélange à sec

De nombreuses pièces de musée exigent une humidité relative de 50 % ; il est donc souhaitable d'avoir sous la main une bonne quantité de gel de silice conditionné à ce degré. Selon la méthode que nous allons exposer, on mélange du gel de silice sec et du gel de silice conditionné à 50 % d'H.R., que l'on conserve ensuite dans un contenant fermé jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Les quantités respectives de gel qui entrent dans ce mélange permettent de porter l'H.R. de 0,5 % à 50 %.

Supposons par exemple que l'on ait besoin de 10,0 kg de gel conditionné pour maintenir l'humidité relative à 30 % dans une petite vitrine, et que l'on dispose déjà d'une bonne quantité de gel de qualité 01 conditionné à une H.R. de 50 % (T.H.E. = 23 %). Pour une H.R. de 30 %, la T.H.E. du gel de qualité 01 est de 15 % (d'après figure 5). On calcule d'abord la masse totale de gel sec dont on a besoin au moyen de l'équation suivante :

$$\begin{aligned} &\text{Masse de gel sec} \\ &= \frac{\text{masse de gel conditionné (kg)}}{1 + \text{T.H.E. (à l'H.R. souhaitée)}} \\ &= \frac{10,0}{1 + 0,15 \%} \\ &= 8,7 \text{ kg} \end{aligned}$$

La masse d'eau nécessaire est donc de

$$10,0 \text{ kg} - 8,7 \text{ kg} = 1,3 \text{ kg}$$

(ou encore de $15 \% \times 8,7 \text{ kg} = 1,3 \text{ kg}$).

Cette eau est fournie par le gel conditionné à 50 % d'H.R. La masse de gel dont on a besoin pour l'obtenir, se calcule au moyen de l'équation suivante (la T.H.E. est de 23 % pour le gel conditionné à 50 % d'H.R.) :

$$\begin{aligned}
 & \text{Masse de gel conditionné à 50 \%} \\
 & \quad (\text{masse d'eau}) \times (1 + \text{T.H.E.}) \\
 & = \frac{\quad}{\text{T.H.E.}} \\
 & = \frac{1,3 \times (1 + 0,23)}{0,23} \\
 & = 7,0 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Placer dans un contenant 7,0 kg de gel de silice conditionné à 50 % d'H.R., et ajouter suffisamment de gel sec pour porter la masse totale à 10,0 kg (c'est-à-dire 3,0 kg). Les grands contenants en métal dans lesquels le gel de silice est normalement expédié conviennent à merveille. Mélanger les gels et fermer le contenant. L'humidité du gel à 50 % passera au gel sec, et on finira ainsi par atteindre un nouvel équilibre. Au bout d'une semaine, on devrait obtenir 10,0 kg de gel à T.H.E. de 15 % et une H.R. équivalente de 30 %.

Méthode par air pulsé

Les méthodes de conditionnement que nous avons décrites jusqu'à présent conviennent à de petites ou moyennes quantités de gel de silice. Lorsqu'on s'en sert pour de grandes quantités (supérieures à 50 kg), les installations nécessaires deviennent quelque peu encombrantes et le conditionnement demande pas mal de temps, en particulier si l'on ne dispose que d'une petite enceinte. Il serait bien peu pratique d'étaler 1000 kg de gel sur des plateaux sur une épaisseur de quelques centimètres.

Une méthode de conditionnement rapide convenant à de grandes quantités de gel de silice a récemment été mise au point et testée par l'I.C.C. Elle est bien adaptée au traitement des barils de gel et il n'est pas nécessaire de retirer le gel de son contenant original, ce qui constitue un avantage. Il s'agit de faire passer à travers le gel de silice, sous pression, l'air de la pièce porté à l'H.R. désirée.

On enlève tout d'abord le couvercle du baril et on le remplace par un tamis qui est solidement maintenu en place par la bande de serrage originale (figure 14). On retourne le baril et on le place sur des supports en bois pour permettre le passage de l'air à travers le tamis et le gel (figure 15). Il s'agit maintenant de relier le dessus du baril à un appareil de succion. Pour cela, pratiquer une ouverture dans la partie supérieure (ce qui était le fond) du baril pour y adapter un tuyau de grand diamètre (par exemple, un tuyau de drainage, une gaine de chauffage ou un tuyau d'échappement flexible pour sècheuse à linge). Sceller le raccord à l'aide d'un ruban adhésif, et relier l'autre bout du tuyau à l'aspiration d'un grand ventilateur à haute pression, par ex. une soufflerie de 750 W d'une capacité de 0,5 m³/s à 15 cm d'eau.

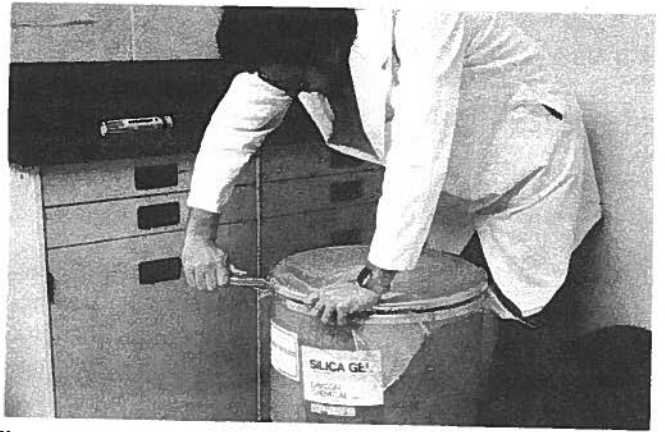


Figure 14 : Le couvercle du baril est remplacé par un tamis en aluminium que l'on maintient en place au moyen de la bande de serrage originale.

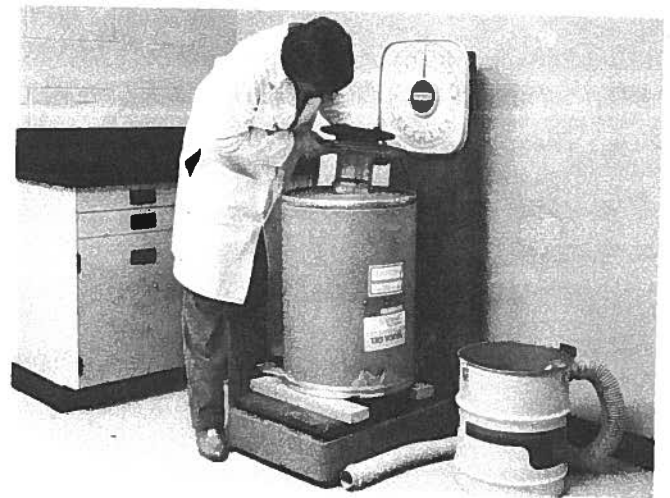


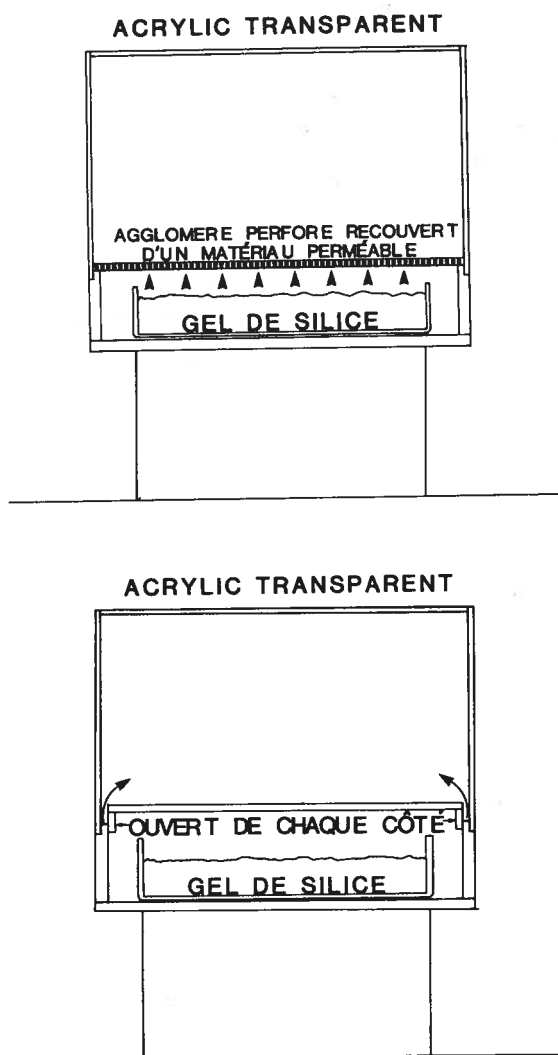
Figure 15 : Le baril est retourné et placé sur des supports en bois. Dans ce qui était le fond à l'origine, on pratique une ouverture permettant tout juste d'introduire la soufflerie d'un aspirateur sec/humide ; cela fait, il faut veiller à bien sceller les joints.

Pour produire la succion nécessaire, on peut aussi utiliser un aspirateur d'atelier sec/humide, bien nettoyé. Retirer le filtre. Relier l'appareil au baril par son tuyau (fixer un tamis au bout du tuyau pour éviter que des particules ne pénètrent dans le baril), ou sortir la soufflerie de l'aspirateur et l'aboucher directement au baril sans tuyau. Dans un cas comme dans l'autre, le tuyau doit être placé à 10 cm au minimum de la surface du gel de silice.

Que l'on utilise un ventilateur ou un aspirateur d'atelier, le tuyau ne doit pas présenter de trous ni de joints non étanches. Toute fuite entre le baril et l'appareil de succion augmentera la durée du conditionnement. Si l'on dispose d'une aspiration de capacité suffisante, le conditionnement peut se faire en trois ou quatre jours. Si l'on utilise une très grande soufflerie, on peut conditionner plusieurs barils simultanément en les reliant en parallèle. Par contre, un aspirateur ne permettra de conditionner qu'un seul baril à la fois.

Quelle que soit la méthode, le gel de silice sera invariablement conditionné à l'humidité relative de la pièce. Si celle-ci est trop élevée ou trop basse, on peut la modifier au moyen d'humidificateurs ou de déshumidificateurs. Pour obtenir les meilleurs résultats, le conditionnement devrait être fait lorsque l'humidité relative est aussi proche que possible du niveau souhaité.

Pour surveiller le progrès du conditionnement, placer le baril sur une balance (un pèse-personnes peut convenir) et contrôler sa masse. L'opération est terminée lorsque la masse a atteint un maximum et est demeurée constante pendant plus d'une journée. La durée du conditionnement dépendra de la capacité d'aspiration et des pertes d'air. Par exemple, si l'appareil aspire $0,033 \text{ m}^3/\text{min}$ d'air, le gel sera conditionné à environ 99 % en quatre jours.



Figures 16a et 16b : Exemples de vitrines bien conçues qui laissent circuler l'humidité entre le plateau de gel de silice et la partie supérieure.

6. COMMENT PLACER LE GEL DE SILICE DANS UNE VITRINE

Normalement, le plateau contenant le gel de silice est placé sur le fond de la vitrine, et sous un faux fond qui le couvre partiellement. Bien que le présent bulletin technique n'ait pas pour objet de traiter en détail de la conception des vitrines, il est important de faire observer qu'elles doivent être construites de façon que l'air puisse passer librement sur le gel (figures 16a et 16b).

La simple diffusion de l'humidité dans l'air devrait suffire à éliminer les fluctuations d'H.R. ou les microclimats; on trouvera peut-être souhaitable, toutefois, d'accélérer le processus dans les vitrines de grandes dimensions ou de grande hauteur, au moyen de petits ventilateurs que l'on peut y incorporer (figure 17). Il y a lieu de choisir un appareil silencieux et produisant peu de chaleur; divers modèles de ventilateurs pour petits ordinateurs, vendus dans les magasins d'appareils électroniques, conviennent pour les vitrines.

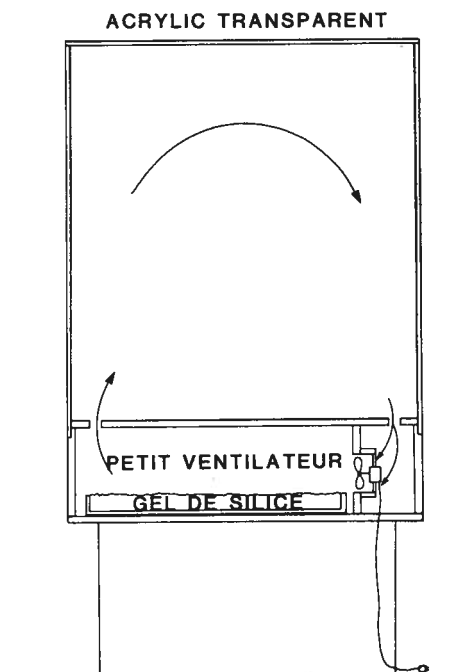


Figure 17 : L'emploi d'un petit ventilateur améliore la circulation de l'air dans les vitrines très grandes ou très hautes.

Il convient de remarquer que l'éclairage des vitrines amène une hausse de la température intérieure, et par conséquent une diminution d'H.R. La seule solution est d'en réduire l'intensité, détail que l'on doit régler au moment de la conception.

7. RÉGULATION DE L'HUMIDITÉ RELATIVE DANS UNE VITRINE TAMPONNÉE AU GEL DE SILICE

7.1 Contrôle de l'humidité relative

Même lorsque l'on place la quantité recommandée de gel de silice dans une vitrine parfaitement conçue qui présente peu de fuites, l'humidité relative diminue lentement en hiver et augmente en été, à l'intérieur d'une plage de 35 à 65 %. Cet écart peut être encore plus grand si les vitrines sont peu étanches, si on les ouvre souvent ou si les variations d'H.R. dans le musée sont très prononcées. Pour déterminer exactement les fluctuations d'H.R., on installe à l'intérieur de la vitrine un hygromètre ou un hygrothermographe assez précis, ou encore on y introduit périodiquement, par une petite ouverture d'accès, le capteur d'un bon hygromètre électronique ; prendre soin de toujours bien refermer l'ouverture après l'opération.

7.2 Reconditionnement du gel

Lorsque l'humidité relative à l'intérieur d'une vitrine s'éloigne trop du niveau souhaitable, il faut soit remplacer le gel qui s'y trouve par du gel conditionné (il peut s'agir de gel déjà utilisé que l'on a recyclé), soit ajouter de l'humidité par une méthode *in situ*, soit enlever de l'humidité par une méthode *in situ*.

Remplacement du gel

Si l'on désire une humidité très stable ou si l'on a des vitrines peu étanches, il pourra être nécessaire de remplacer de temps à autre le gel épuisé par du gel nouvellement conditionné.

Recyclage du gel

Si le gel utilisé se trouve dans des sacs, il est facile de déterminer, en le pesant, s'il convient de lui ajouter ou de lui enlever de l'humidité pour le ramener à la T.H.E. désirée. Si la teneur en humidité a baissé, on rajoutera la quantité d'eau correspondant à la différence de masse. Le gel de silice dont la T.H.E. est plus élevée que celle que l'on désire sera quant à lui partiellement desséché ; on utilisera pour ce faire une température inférieure (environ 60 °C) à celle du premier conditionnement pour éviter d'endommager le tissu des sacs. Il n'est pas nécessaire de procéder à une réactivation complète tant que la masse du gel en sac est inférieure à la masse totale désirée. Dans l'exemple donné plus haut, la masse désirée était de 6,0 kg. Si la masse du gel épuisé est de 5,5 kg, il suffit de verser 0,5 kg (0,5 L) d'eau dans le plateau de conditionnement. On répète ensuite l'opération jusqu'à ce que l'on obtienne une masse finale de 6,0 kg.

Addition d'humidité par une méthode de reconditionnement *in situ*

Cette méthode *in situ* exige la présence d'un hygromètre à l'intérieur de la vitrine, ou encore une ouverture d'accès par laquelle on puisse introduire périodiquement un capteur. On augmente l'humidité à l'intérieur de la vitrine au moyen d'un petit contenant d'eau que l'on place dans le plateau de gel de silice (figure 18). Il faut prévoir un faux fond couvrant partiellement le contenant d'eau et le plateau de gel pour empêcher qu'il n'y ait des points localisés de forte humidité près des objets exposés. Pour une meilleure régulation de l'H.R., placer un couvercle en plexiglas présentant plusieurs petits trous (1 cm de diamètre) sur le contenant d'eau (figure 19). Les figures 20 et 21 montrent un autre type de couvercle qui a l'avantage de permettre une variation du taux d'évaporation au moyen d'un dispositif commandé de l'extérieur de la vitrine. Il s'agit d'une plaque en plexiglas fixe, percée d'une ouverture triangulaire. Une deuxième plaque, de taille suffisante pour couvrir le trou, est placée au-dessus de la première. On peut la faire coulisser au moyen d'un système à goujon et à roue ou au moyen d'une corde et d'une poulie pour découvrir graduellement l'ouverture triangulaire. On obtient de cette façon une régulation beaucoup plus précise de la libération ou de l'absorption d'humidité.

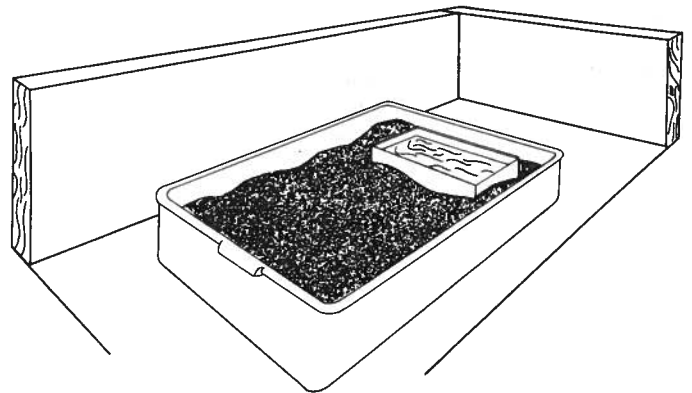


Figure 18 : On place un petit contenant d'eau dans le plateau de gel de silice pour accroître l'humidité à l'intérieur de la vitrine.

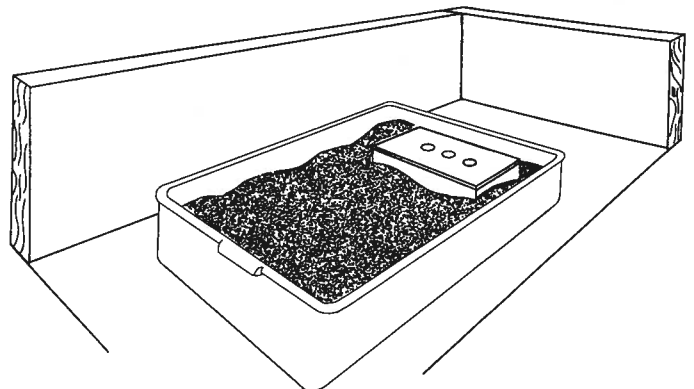


Figure 19 : Pour une meilleure régulation de l'humidité relative, on place sur le contenant d'eau un couvercle de plexiglas présentant plusieurs petits trous.

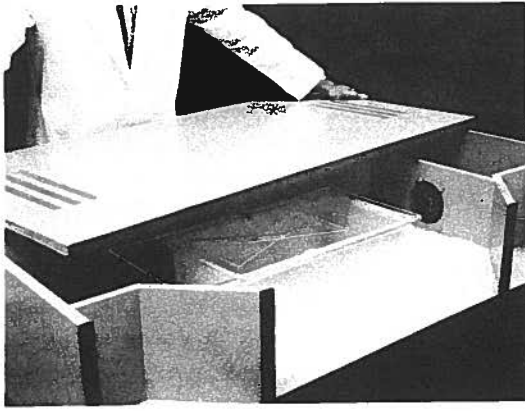


Figure 20 : On se sert d'un couvercle en plexiglas pour régulariser la libération d'eau durant le reconditionnement in situ. La partie inférieure, qui recouvre le contenant, possède une grande ouverture triangulaire. La partie supérieure coulisse sur la première pour découvrir plus ou moins la fente.

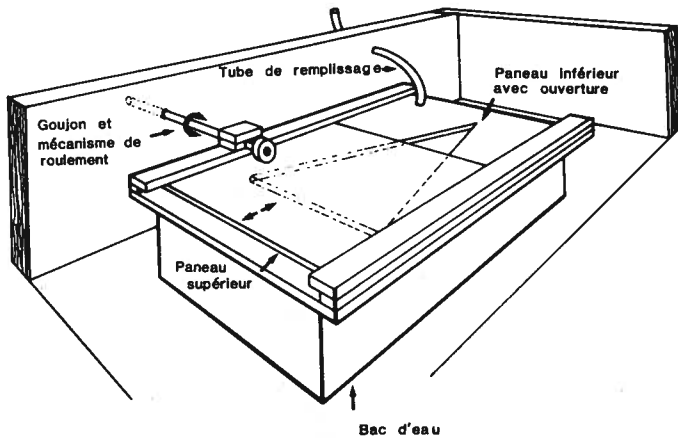


Figure 21 : On se sert d'un système à roue et goujon pour faire coulisser la plaque.

Cette méthode *in situ* doit être utilisée de préférence avant que H.R. n'ait varié de plus de 10 % par rapport au point de contrôle. Supposons que l'humidité relative à l'intérieur de notre petite vitrine, qui était originellement stabilisée à 50 % avec un gel de silice conditionné, se mette à baisser lentement au cours des mois d'hiver. Au bout de trois semaines, l'H.R. pourrait être tombée à 42 %, et la T.H.E. du gel serait alors de 20 % (d'après la courbe de la T.H.E. en fonction de l'H.R.). La quantité d'eau perdue peut être facilement calculée au moyen de la formule suivante³ :

$$\begin{aligned}
 &\text{Masse d'eau perdue} \\
 &= (\text{T.H.E. initiale} - \text{nouvelle T.H.E.}) \times \text{masse du gel sec (kg)} \\
 &= (0,23 - 0,20) \times 5,0 \\
 &= 0,15 \text{ kg (0,15 L d'eau)}
 \end{aligned}$$

Si l'on connaît la masse conditionnée, on peut calculer la masse sèche au moyen de cette équation, que nous avons déjà donnée :

$$\begin{aligned}
 &\text{Masse du gel sec} \\
 &= \frac{\text{masse de gel conditionné}}{1 + \text{T.H.E.}}
 \end{aligned}$$

Dans notre exemple, le gel conditionné a perdu environ 0,15 L d'eau en trois semaines. Pour régénérer cette humidité, verser 0,15 L d'eau dans le petit contenant. La vitesse à laquelle l'eau s'évapore et est absorbée par le gel de silice dépend principalement de la taille des ouvertures du contenant. Au départ, boucher tous les trous sauf un ou deux. Si l'H.R. n'augmente pas, ouvrir quelques trous de plus. Une fois que l'on a déterminé le nombre de trous nécessaires pour une vitrine donnée, il convient de noter ce renseignement, car il sera encore valable à l'avenir lorsqu'il y aura lieu de répéter l'opération avec la même vitrine (un taux d'augmentation d'environ 1 ou 2 % d'H.R. par jour est acceptable).

Élimination d'humidité par une méthode in situ

En été, l'humidité est normalement au-dessus de 50 %, ce qui provoque une hausse de la T.H.E. du gel. Pour régénérer le gel, il faut éliminer de l'eau. Pour ce faire, on peut placer une certaine quantité de gel de silice sec activé dans un petit contenant à l'intérieur du plateau. Pour calculer précisément la quantité nécessaire, il faut connaître la masse d'eau déjà absorbée. On obtiendra ce chiffre soit en pesant le gel, soit en se servant de l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 &\text{Masse d'eau absorbée} \\
 &= (\text{nouvelle T.H.E.} - \text{T.H.E. originale}) \times \text{masse initiale de gel sec}
 \end{aligned}$$

La masse de gel de silice sec à ajouter est alors calculée au moyen de l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 &\text{Masse de gel sec à ajouter} \\
 &= \frac{\text{masse d'eau absorbée}}{\text{T.H.E. initiale}}
 \end{aligned}$$

Si, par exemple, le gel de silice a absorbé 0,25 kg d'eau, la masse de gel sec à ajouter pour ramener l'H.R. à l'intérieur de la vitrine à 50 % est la suivante :

$$\begin{aligned}
 &\text{Masse de gel sec} \\
 &= \frac{0,25}{0,23} \\
 &= 1,1 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

³ Ceci ne prend en considération que la quantité d'eau perdue par le gel de silice, et ne tient pas compte de l'eau perdue par les objets mêmes et par les matériaux qui constituent la vitrine. Ces deux éléments sont difficiles à déterminer et ont été omis par souci de simplicité.

Annexe 1: Effets de l'hystérésis et de la température sur les courbes de la T.H.E. en fonction de l'H.R.

Une substance a une teneur en humidité à l'équilibre précise et spécifique à une humidité relative donnée ; c'est ce qu'illustre la courbe de la T.H.E. en fonction de l'H.R. (figure 3).

Par souci de simplicité, nous avons jusqu'à présent laissé de côté deux facteurs : la température et l'hystérésis. En effet, les courbes de la T.H.E. en fonction de l'H.R. changent avec la température. Celles que nous avons reproduites dans le présent bulletin ont été dressées à la température ambiante. Bien que la forme de la courbe reste essentiellement la même, sa position sur le graphique suit les fluctuations de température. Ainsi, une substance dont la T.H.E. est de 20 % à une H.R. de 50 % à 20 °C peut ne contenir que 18 % d'humidité à 30 °C, même si l'H.R. demeure inchangée. Normalement, l'effet de la température est faible. Pour le bois, la variation est d'environ de 1 % T.H.E. par tranche de fluctuation de 10 °C. Pour le gel de silice, elle est négligeable : moins de 1 % pour un changement de 50 °C.

On définit l'hystérésis comme «le retard de l'effet sur la cause dans le comportement des corps soumis à une action croissante, puis décroissante». Ainsi, une substance peut avoir une teneur en humidité à l'équilibre de 20 % à une H.R. de 50 % si elle a été préalablement exposée à des H.R. très basses, mais par contre avoir une teneur en humidité de 22 % à une H.R. de 50 % si elle a été préalablement exposée à des conditions très humides. Des effets d'hystérésis atteignant quelques unités pour cent sont fréquents. Les courbes pour le gel de silice données aux figures 5 et 6 représentent l'absorption seulement, c'est-à-dire les valeurs obtenues lorsque le gel de silice passe de l'état sec à l'état hydraté. Étant donné que le conditionnement du gel de silice suit ordinairement ce processus (de sec à humide), les courbes d'absorption suffisent pour les calculs.

Annexe 2: Explication du mécanisme de tamponnage

La figure 22 montre un agrandissement de la courbe de la T.H.E. en fonction d'H.R. au voisinage de 50 % d'humidité relative.

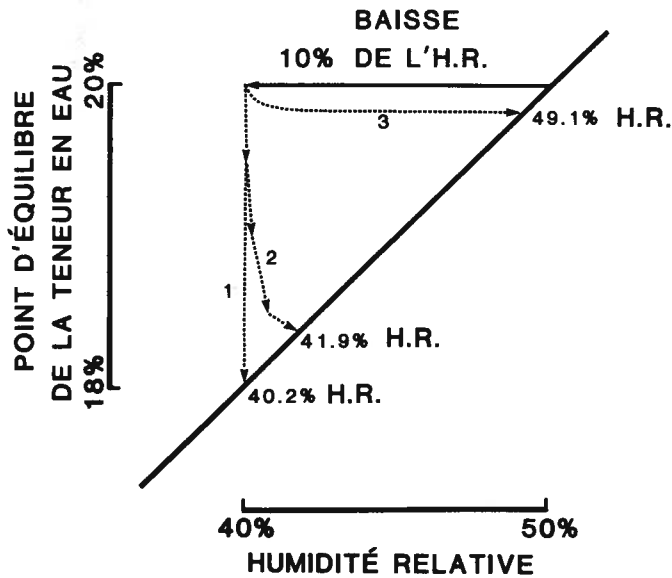


Figure 22: Agrandissement de la courbe de la T.H.E. en fonction d'H.R. pour un agent tampon théorique.

Supposons que nous plaçons 1 kg de produit de tamponnage dans une grande pièce scellée de 500 m³. L'humidité relative de la pièce est de 50,0 %, et la teneur en humidité du produit est de 20,0 %; celui-ci se trouve donc en équilibre. Imaginons que l'H.R. de la pièce tombe subitement à 40,0 %, comme le montre la ligne continue de la figure 22. Le produit n'est plus en équilibre; pour atteindre la nouvelle teneur en humidité à l'équilibre de 18,0 %, il doit libérer 2,0 % de son humidité ou 20 g d'eau, comme l'indique la première ligne pointillée. Ceci a pour effet d'augmenter l'H.R. de la pièce, que l'on peut calculer facilement au moyen de la méthode exposée ci-dessous.

Les tables appropriées indiquent que, à 20 °C, un volume d'air de 500 m³ contient 8,56 kg d'eau au point de saturation (c.-à-d. à 100 % d'H.R.). L'humidité relative à une température donnée est définie de cette manière :

$$\text{H.R. (\%)} = \frac{\text{humidité absolue de l'échantillon d'air}}{\text{humidité absolue de l'air saturé}} \times 100$$

À partir de ce qui précède, nous pouvons calculer la quantité initiale d'eau dans l'air (humidité absolue ou W) de la façon suivante:

$$40 = \frac{W (\text{échantillon d'air})}{8,56} \times 100$$

$$\begin{aligned} W (\text{échantillon d'air}) &= 0,40 \times 8,56 \text{ kg} \\ &= 3,42 \text{ kg d'eau} \end{aligned}$$

Du fait de la libération de 20 g d'eau, l'air contient maintenant 3,44 kg d'eau, et la nouvelle H.R. est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{H.R.} &= \frac{3,44}{8,56} \\ &= 0,402 \\ &= 40,2 \text{ \%} \end{aligned}$$

Par conséquent, le produit a porté un changement d'humidité de 10,0 % à 9,8 %. Comme la pièce était très grande, le tamponnage n'a pas eu beaucoup d'effet.

Nous avons fait dans cet exemple certaines hypothèses simplificatrices; en réalité, le produit libère son eau graduellement et chaque petite quantité d'eau libérée modifie l'humidité relative de la pièce. À mesure que change cette dernière, la teneur en humidité à l'équilibre que le produit doit atteindre change également. Par conséquent, le produit ne libère pas tout à fait 20 g d'eau, puisque à 40,2 % d'H.R. sa T.H.E. n'est pas de 18 %, mais bien de 18,04 %. Il est très important de comprendre ce point, car il amène une différence considérable dans les résultats des deux prochains exemples. Encore une fois pour simplifier les choses, la teneur en humidité sera calculée par rapport à la masse totale plutôt que par rapport à la masse sèche, comme c'est normalement le cas.

Supposons que l'on place la même quantité de produit, soit 1 kg, dans une petite pièce de 50 m³, les conditions étant les mêmes qu'à l'exemple précédent. Le produit doit encore libérer 2,0 % d'humidité pour atteindre son point d'équilibre. En utilisant de nouveau l'équation ci-dessus, nous pouvons calculer la quantité initiale d'eau dans l'air; nous constaterons qu'elle est de 342 g (la saturation serait atteinte à 856 g). La libération d'eau est progressive, de même que son effet sur l'H.R. et la nouvelle T.H.E. Supposons qu'après une courte période 5 g d'eau (0,5 % de la masse totale) ont été libérés. L'humidité relative à l'intérieur de la petite pièce devient la suivante :

$$\begin{aligned} \text{H.R.} &= \frac{342 + 5}{856} \\ &= 0,405 \\ &= 40,5 \text{ \%} \end{aligned}$$

Nous avons donc une nouvelle T.H.E., et la ligne pointillée (2) de la figure 20 s'écarte légèrement vers la droite pour indiquer cette nouvelle condition. Libérons encore 5 g d'eau, et l'H.R. s'élève à 41,1 %. La T.H.E. à cette humidité relative est de 18,2 %. Encore 5 g, portant le total à 15 g d'H.R. est maintenant de 41,7 %, et la T.H.E. équivalente de 18,3 %. La teneur réelle en humidité du produit n'est que légèrement supérieure (18,5 %). La

libération finale de 1,3 g porte l'H.R. à 41,9 % pour une T.H.E. équivalente de 18,4 %. En conséquence, après avoir libéré 16,3 g d'eau, le produit présente une teneur en humidité réelle de 18,4 %, et se trouve en équilibre avec l'air. Comme la baisse initiale de 10,0 % H.R. a été réduite à 8,1 %, on voit comment la substance tampon contribue à réaliser l'équilibre de l'humidité relative.

Il importe de remarquer que le rapport de la taille de la pièce à la quantité d'agent tampon détermine l'ampleur du tamponnage (comme on a pu l'observer dans les deux derniers exemples). Pour notre prochain exemple, le volume d'air ne correspond plus qu'à celui d'une vitrine de 1 m³. De nouveau, on suppose que l'H.R. baisse subitement pour se retrouver à 40,0 %, ce qui exige la libération de 20 g d'eau pour atteindre un nouvel équilibre. Il est clair que l'eau libérée aura un effet significatif sur l'humidité relative de la vitrine.

À 20 °C, 1 m³ d'air saturé (100 % d'H.R.) contient 17,1 g d'eau ; à 40,0 % d'H.R., il en contient 6,85 g. Supposons maintenant que l'eau est libérée par petits incréments de 2 g. Le tableau 3 montre les changements graduels qui se produisent dans la teneur en humidité réelle, la quantité d'eau libérée, l'humidité relative à l'intérieur de la vitrine ; il indique enfin la nouvelle teneur en humidité à l'équilibre,

ce qu'illustre également la troisième ligne pointillée de la figure 20.

En libérant seulement 1,6 g d'eau, le produit a réussi à tamponner une chute initiale de 10,0 % d'H.R. ; la baisse a été ramenée à 0,9 %. Sa teneur en humidité n'a baissé que de 0,16 % avant d'atteindre le nouvel équilibre. Il pourrait donc tamponner encore d'autres changements.

En pratique, l'humidité à l'intérieur d'une vitrine change lentement et graduellement, et non par bonds de 10 %. Le mécanisme reste toutefois le même, quoique sur une échelle très réduite, avec le même résultat final.

On peut déduire des exemples précédents que la quantité d'agent tampon est une fonction directe de la qualité du tamponnage pour un volume d'air donné, et que la teneur en humidité réelle du produit doit être relativement élevée pour qu'il puisse libérer suffisamment d'eau dans l'air. Ce point est illustré par la pente de la courbe de la T.H.E. en fonction de l'H.R., qui est forte au voisinage du niveau d'humidité souhaité. Les mêmes exigences s'appliquent lorsque l'humidité est au-dessus du point d'équilibre, sauf que dans ce cas l'agent tampon absorbe de l'eau au lieu d'en libérer.

TABLEAU 3
VALEURS DE LA T.H.E. ET DE L'H.R. PRÉDITES D'APRÈS LE MÉCANISME DE
TAMPONNAGE DÉCRIT À L'ANNEXE 2

Eau libérée	Teneur réelle en humidité (%)	H.R. de la vitrine (%)	Nouvelle T.H.E. (%)
0,0	20,00	40,0	18,00
0,2	19,98	41,2	18,23
0,4	19,96	42,3	18,46
0,6	19,94	43,5	18,70
0,8	19,92	44,7	18,94
1,0	19,90	45,9	19,18
1,2	19,88	47,1	19,42
1,4	19,86	48,2	19,64
1,5	19,85	48,8	19,76
1,6	19,84	49,1	19,84

Annexe 3: Exemples de calculs

Les exemples suivants visent à mieux faire comprendre les méthodes exposées dans le texte.

Comment déterminer le volume de la vitrine

Prenons par exemple une vitrine mesurant 0,61 m × 1,22 m × 1,83 m (ceci comprend l'espace situé au-dessous du faux fond).

$$\begin{aligned}\text{Volume de la vitrine en m}^3 \\ &= 0,61 \text{ m} \times 1,22 \text{ m} \times 1,83 \text{ m} \\ &= 1,36 \text{ m}^3\end{aligned}$$

On veut maintenir une humidité relative (H.R.) de 50 % à l'intérieur de cette vitrine en utilisant du gel de silice de qualité 01 qui a été séché au four puis stocké dans un contenant parfaitement étanche.

Quantité de gel nécessaire

Masse de gel conditionné dont on a besoin pour la vitrine, sans qu'il soit tenu compte du volume occupé par les objets exposés :

$$\begin{aligned}\text{Masse} &= \text{volume (m}^3) \times 20 \text{ kg/m}^3 \\ &= 1,36 \times 20 \\ &= 27,2 \text{ kg}\end{aligned}$$

D'après la figure 5, la teneur en humidité à l'équilibre (T.H.E.) équivalente pour le gel de silice de qualité 01 est de 23 % pour une H.R. de 50 %.

Masse de gel *sec* nécessaire :

$$\begin{aligned}\text{Masse} &= \frac{\text{masse conditionnée (kg)}}{1 + \text{T.H.E.}} \\ &= \frac{27,2}{1 + 0,23} \\ &= \frac{27,2}{1,23} \\ &= 22,1 \text{ kg}\end{aligned}$$

Comment faire absorber de l'humidité au gel de silice

$$\begin{aligned}\text{Masse d'eau à ajouter} \\ &= \text{T.H.E.} \times \text{masse sèche (kg)} \\ &= 0,23 \times 22,1 \\ &= 5,1 \text{ kg (5,1 L d'eau)}\end{aligned}$$

On peut également calculer la quantité d'eau nécessaire en soustrayant la masse sèche de la masse conditionnée :

$$\begin{aligned}\text{Masse d'eau à ajouter} \\ &= 27,2 - 22,1 \\ &= 5,1 \text{ kg (5,1 L d'eau)}\end{aligned}$$

Le gel de silice est plus facile à manipuler lorsqu'il se trouve dans des sacs (section 5.3). Si toutefois l'on conditionne du gel en vrac, il est préférable de tarer le tamis avant de commencer, afin d'éliminer la nécessité de transférer le gel de silice du tamis à un autre contenant pour la pesée. Ainsi, on pèse le tamis et le gel ensemble et on déduit la masse du tamis de la masse totale pour obtenir la masse du gel seule.

Placer 22,1 kg de gel sec sur le tamis, à l'intérieur d'une enceinte de conditionnement contenant un petit ventilateur, et verser 5,1 kg (ou L) d'eau dans le plateau en dessous. Sceller l'enceinte. Après une journée toute l'eau s'est évaporée, et la masse du gel de silice atteint 26,4 kg.

Comme la masse conditionnée finale doit être de 27,2 kg, il faut encore ajouter de l'eau.

$$\begin{aligned}\text{Masse d'eau à ajouter} \\ &= 27,2 \text{ kg} - 26,4 \text{ kg} \\ &= 0,8 \text{ kg (0,8 L d'eau)}\end{aligned}$$

On répète l'opération, mais en ne mettant cette fois dans le plateau que 0,8 L d'eau.

Après deux jours toute l'eau s'est évaporée, et le gel de silice pèse maintenant 27,1 kg. Étant donné que nous sommes à moins de 1 % de la masse requise, il n'est plus nécessaire d'ajouter d'eau.

Comment faire absorber de l'humidité par une méthode *in situ*

On étale ensuite le gel dans un plateau (ou des plateaux) placé sous le faux fond de la vitrine, et celle-ci est scellée de nouveau. Après quatre semaines, l'H.R. s'est abaissée progressivement pour atteindre 41 % (l'H.R. à l'intérieur du musée est alors bien au-dessous de 20 %).

On choisit alors d'utiliser une méthode de reconditionnement *in situ*. Sachant que la T.H.E. du gel à 41 % d'H.R. est de 20 % (d'après la figure 5), on calcule la perte d'eau de la façon suivante :

$$\begin{aligned}\text{Masse d'eau perdue} \\ &= (\text{T.H.E. initiale} - \text{nouvelle T.H.E.}) \times \text{masse sèche du gel (kg)} \\ &= (0,23 - 0,20) \times 22,1 \\ &= 0,66 \text{ kg (équivalent à 0,66 L d'eau)}\end{aligned}$$

On place cette quantité d'eau dans un petit contenant au milieu du plateau de gel de silice (sous le faux fond). On ouvre trois trous de 1 cm, et après quatre jours l'H.R. est remontée à 43 %. On ouvre encore deux trous, et l'H.R. s'élève à environ 49 % après trois autres jours.

Comment enlever de l'humidité par une méthode in situ

Dans le même musée, au cours d'un été assez humide, l'H.R. s'élève à 58 %. Il est donc nécessaire d'extraire de l'eau en ajoutant du gel de silice sec. Cette opération est illustrée par l'exemple suivant.

En utilisant la même équation qui a servi pour l'addition d'humidité, on peut déterminer l'excès d'eau. Cette fois, cependant, il faut inverser l'ordre des T.H.E. (initiale et nouvelle). Sachant que la T.H.E. du gel à 58 % est de 25 %, on peut faire les calculs suivants :

$$\begin{aligned} \text{Masse d'eau en excès} &= (\text{nouvelle T.H.E.} - \text{T.H.E. initiale}) \times \text{masse sèche} \\ &\quad \text{du gel (kg)} \\ &= (0,25 - 0,23) \times 22,1 \\ &= 0,44 \text{ kg} \end{aligned}$$

La masse de gel sec qui doit être ajoutée pour absorber cet excès d'humidité se calcule de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Masse de gel sec} &= \frac{\text{masse d'eau en excès (kg)}}{\text{T.H.E. initiale}} \\ &= \frac{0,44}{0,23} \\ &= 1,9 \text{ kg} \end{aligned}$$

On met donc cette quantité de gel sec dans un petit contenant que l'on place au milieu du plateau de gel de silice (sous le faux fond). De nouveau, on ouvre suffisamment de trous pour que l'H.R. à l'intérieur de la vitrine descende graduellement au voisinage de 50 %.

Dans le cas de ces deux derniers exemples de reconditionnement *in situ*, il est essentiel de surveiller l'humidité relative à l'intérieur de la vitrine pour s'assurer qu'elle ne varie pas trop ni trop rapidement.

