



Patrimoine
canadien

Institut
canadien de
conservation

Canadian
Heritage

Canadian
Conservation
Institute

Bulletin technique

1

L'humidité relative dans les musées : importance, mesure et régulation

Par K.J. Macleod

	Page
L'humidité relative dans les musées: importance, mesure et régulation.	
1. Introduction	1
2. Définition de l'humidité relative	2
3. Comportement des matériaux exposés à l'humidité	4
4. Échelles optimales d'humidité relative	6
5. Mesure de l'humidité relative	7
6. Méthodes de régulation de l'humidité relative	11
Renvois	13
Bibliographie	13

Texte français établi par
Jean-Paul Morisset

Résumé

L'humidité de l'air joue un rôle important dans la détérioration des oeuvres d'art et des pièces de musée. Le présent bulletin définit l'humidité relative (ou H.R.), mesure de la teneur en vapeur d'eau de l'air, et explique comment elle contribue, parfois conjointement avec des polluants atmosphériques, à fendiller et à écailler les couches de peinture, à contracter le bois, à faire gondoler le parchemin et le papier, à corroder le métal, à provoquer de la moisissure et la croissance de fungus, etc. Il donne en outre l'échelle de l'H.R. acceptable dans les musées. Il décrit également certains des appareils utilisés pour mesurer l'humidité relative et explique brièvement les méthodes de réglage disponibles.

Abstract

Moisture in the atmosphere plays a substantial role in the deterioration of works of art and museum objects. In this bulletin the relative humidity or RH, a measure of the moisture content of air, is described and the part it plays, sometimes in conjunction with atmospheric pollutants, is discussed in terms of the cracking and flaking of paint layers, the shrinking of wood, the cockling of parchment and paper, the corrosion of metal, the growth of moulds and fungi, etc. A range of acceptable RH values is suggested for museums. Some of the equipment available for monitoring relative humidity is described and the techniques available for controlling it are briefly discussed.

1. Introduction

La détérioration des oeuvres d'art et des objets de musée commence avec leur existence même et se poursuit aussi longtemps qu'ils durent. Les objets de fer rouillent (cas particulier d'un problème plus général, celui de la corrosion des métaux), les tableaux se fendillent et la couche de peinture peut s'écailler, le bois gauchit, le papier gondole et se décolore, les tissus et le papier pourrissent, le cuir se gâte, etc. Cette détérioration est naturelle: il s'agit de la réaction par laquelle ces objets arrivent à un point d'équilibre chimique et physique avec leur milieu. Par exemple, l'état naturel ou état d'équilibre du fer dans l'atmosphère est celui de l'oxyde: la rouille. Avec le temps, tous les objets de fer finissent par se transformer en rouille, mais cette tendance s'accroît lorsque l'humidité atmosphérique s'accroît. Lorsque des matières poreuses comme le bois passent d'une atmosphère sèche à un milieu humide, elles absorbent de la vapeur d'eau et enflent jusqu'à ce qu'elles atteignent un nouvel équilibre.

L'environnement industriel moderne contient des quantités substantielles d'anhydride sulfureux, sous-produit de la fabrication de nombreux métaux et de l'usage de combustibles comme la houille et le pétrole. En présence de l'air et de l'eau, l'anhydride sulfureux se transforme en acide sulfurique. L'exposition à des matières qu'on appelle catalyseurs — en l'occurrence, les sels et les acides du fer — accélère énormément cette formation d'acide sulfurique. Or, l'acide sulfurique attaque la plupart des matières. Le papier se décolore et devient cassant; les molécules longues des matières fibreuses comme les papiers et les tissus se rompent sous l'action de l'acide et la matière perd sa résistance; le cuir s'affaiblit et finit par tomber en poussière; le marbre se transforme et peut se désintégrer. L'exposition à la lumière amorce beaucoup d'autres réactions de détérioration.

Les variations d'humidité peuvent être particulièrement dangereuses pour les objets

composites. Par exemple, les subjectiles de bois des peintures sur panneau se dilatent et se contractent tour à tour suivant l'augmentation ou la diminution de l'humidité relative de l'atmosphère. La pellicule de couleur ne peut supporter ce mouvement (particulièrement les pellicules anciennes, plus cassantes): la peinture se fendille pour finalement s'écailler.

Les processus biologiques subissent également les effets de l'humidité relative. La croissance de moisissures accompagne souvent



Tableau endommagé par suite d'un mauvais réglage de l'humidité. La pellicule de couleur a commencé par se fendiller pour ensuite cloquer et s'écailler. Collection de recherche du LNR, Galerie nationale du Canada, Ottawa.

un excès d'humidité. Les champignons prospèrent dans une atmosphère humide: des moisissures se forment rapidement sur les matières comme le cuir, le papier et les tissus, dont elles se nourrissent. Leur présence peut tacher ces matières et, dans les cas extrêmes, détruire les objets eux-mêmes.

Ce ne sont là que quelques-uns des nombreux exemples que l'on pourrait donner pour montrer l'influence que l'humidité de l'air, isolément ou de concert avec la lumière ou d'autres composantes atmosphériques, peut exercer sur la détérioration d'un large éventail d'objets. Avant d'aller plus loin, toutefois, il convient de définir plus précisément ce que l'on entend par "humidité" et d'étudier le concept d'humidité relative.

2. Définition de l'humidité relative

Imaginons un volume d'air, mettons un pied cube ou un mètre cube, sous une pression atmosphérique normale, et retirons-en toute la vapeur d'eau qui s'y trouve en suspension, ce que l'on peut faire en réduisant considérablement la température, c'est-à-dire en faisant littéralement geler l'eau, ou encore en soumettant le volume d'air à l'action d'un agent déshydratant (dessiccatif). Il suffit alors de peser l'eau pour connaître la teneur en vapeur d'eau de l'échantillon d'air original, en livres par pied cube ou en grammes par mètre cube. On appelle cette teneur l'humidité absolue. On peut également exprimer l'humidité absolue en fonction d'un poids unitaire d'air, c'est-à-dire en livres d'eau par livre d'air ou en grammes d'eau par kilogramme d'air. Cette dernière méthode de calcul de l'humidité absolue est employée dans de nombreux ouvrages portant sur la conservation, comme dans l'article de Plenderleith et Philippot sur la climatologie des musées.⁴

Cependant, les genres de détérioration dont nous avons parlé ne sont pas proportionnels à l'humidité absolue. Le fait qu'un objet absorbe ou libère de l'humidité ne dépend pas tant de

l'humidité absolue que de la capacité qu'a l'air de contenir plus d'humidité. Contrairement à l'humidité absolue, cette capacité dépend de la température de l'air. Il faut donc définir un concept un peu plus complexe, qui tienne compte de la température; ce concept, c'est l'humidité relative.

Représentons-nous un mètre cube d'air dans un récipient fermé, à la température de 20°C (68°F), et supposons que ce mètre cube d'air contienne 9 grammes de vapeur d'eau; l'humidité absolue est de 9 g/m³. Supposons que nous ouvrons un robinet pour laisser couler 3 grammes d'eau dans le récipient; toute cet eau s'évapore et l'humidité absolue s'élève alors à 12 g/m³. Si nous avons laissé pénétrer 8 grammes d'eau dans le récipient, toute l'eau se serait également évaporée (humidité absolue: 17 g/m³); mais si nous y avons laissé pénétrer plus que ces 8 grammes, 8 grammes seulement se seraient évaporés; l'excédent serait resté à l'état liquide. Par exemple, si nous avons ajouté 10 grammes d'eau, 8 grammes se seraient évaporés, pour arriver à une humidité absolue de 17 grammes par mètre cube, et une petite flaque de 2 grammes d'eau se serait formée au fond du récipient. A 20°C, l'air ne peut contenir que 17 grammes de vapeur d'eau par mètre cube et il est normalement impossible d'y ajouter plus que cette quantité d'humidité. Dans ces conditions, l'air est à son degré maximum d'humidité absolue; on dit qu'il est saturé.

L'humidité relative (HR) est le rapport, exprimé en pourcentage, entre l'humidité absolue de l'échantillon d'air et celle d'un air saturé d'eau à la même température:

$$HR = \frac{\text{Humidité absolue de l'échantillon d'air} \times 100}{\text{humidité absolue de l'air saturé}}$$

Par exemple, l'humidité relative, ou HR, de l'air que nous avons au début de l'exemple ci-haut était de:

$$\frac{9}{17} \times 100 = 53\%$$

Après y avoir ajouté 3 grammes d'eau, on aurait trouvé qu'elle était de:

$$\frac{12}{17} \times 100 = 71\%$$

Au point de saturation, bien entendu, l'humidité relative serait de 100%. Le tableau I donne quelques exemples de l'humidité absolue de l'air saturé à différentes températures.

TABLEAU I

Humidité absolue de l'air saturé à différentes températures

°C	°F	Grammes d'eau par mètre cube d'air
-50	-58	0.04
-40	-40	0.12
-30	-22	0.34
-20	-4	0.90
-10	14	2.1
-5	23	3.2
0	32	4.8
5	41	6.8
10	50	9.4
15	59	13.
20	68	17.
25	77	23.
30	86	30.
35	95	40.
40	104	51.

Les chiffres d'humidité absolue de la troisième colonne ont été calculés à partir des données sur la pression de la vapeur figurant dans *Le Handbook of Chemistry and Physics*, 50e édition (The Chemical Rubber Company, Cleveland, Ohio, 1969).

La quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir s'accroît à mesure que la température s'élève. En conséquence, une humidité absolue donnée correspond à une humidité relative de plus en plus basse à mesure que la température de l'air augmente. Par exemple, prenons l'échantillon d'air dont nous avons parlé, qui contenait 9 grammes de vapeur d'eau par mètre cube. Nous avons vu qu'à 20°C, son humidité relative était de 53%. A 25°C (77°F), l'air peut contenir un maximum de 23 grammes d'eau par mètre cube, de sorte que si nous chauffions notre échantillon d'air pour en porter la température de 20°C à 25°C, son humidité relative tomberait de 53% à:

$$\frac{9}{23} \times 100 = 39\%$$

Si l'on continuait à chauffer l'échantillon, l'HR baisserait encore. Nous comprenons maintenant pourquoi, en hiver, à l'intérieur, l'air peut avoir une humidité relative si basse. A l'extérieur, l'air peut être à -20°C (-4°F) et même si l'humidité relative est de 100%, l'humidité absolue n'est que de 0,9 gramme par mètre cube. Si l'on introduit cet air à l'intérieur et qu'on le chauffe à 20°C (68°F), l'humidité relative ne sera que de:

$$\frac{0,9}{17} \times 100 = 5\%$$

Bien entendu, le contraire peut également se produire, de sorte que si la température baisse, comme cela peut arriver la nuit, l'humidité relative augmente. Quand une pièce est chauffée à 25°C (77°F) et que l'humidité relative y est de 80%, l'humidité absolue est d'environ 18 grammes par mètre cube. Si la température baissait jusqu'à environ 21°C (69,8°F), l'humidité relative s'élèverait jusqu'à 100%. Si la température baissait encore au-dessous de 21°C (même légèrement), l'air ne pourrait plus retenir 18 grammes de vapeur d'eau par mètre cube et l'eau se condenserait en buée ou en gouttelettes. C'est pourquoi l'on appelle point de rosée la température à laquelle l'HR est de 100%. On peut

voir cette condensation se produire quand on souffle sur un miroir froid. Si l'on transporte un objet d'un milieu frais à une pièce chaude, cet objet risque de refroidir suffisamment l'air ambiant immédiat pour que l'humidité relative y atteigne 100% et que la vapeur se condense à la surface de l'objet.

Fait à remarquer, l'humidité absolue (et, partant, l'humidité relative) est presque totalement insensible à la pression atmosphérique. On peut donc négliger l'effet d'un changement de pression sur l'HR, par exemple lorsqu'on transporte un objet en avion ou lorsqu'on l'expose dans un musée situé à haute altitude. En revanche, on doit absolument tenir compte des changements de température.

3. Comportement des matériaux exposés à l'humidité

Contrairement à l'humidité absolue, l'humidité relative correspond à l'absorption de vapeur d'eau par différentes substances. A un pourcentage d'HR donné, le bois, le papier, le cuir, les tissus, etc., atteignent un point d'équilibre, spécifique pour chaque matière, auquel ils ont une teneur en eau constante. Dans la pratique, on doit tenir compte de certaines complications, dites "effets d'hystérésis"*, mais nous ne le ferons pas ici. Si l'humidité relative augmente, la teneur de la matière en eau monte jusqu'à ce que l'on atteigne un nouveau point d'équilibre, après quoi elle se stabilise et reste constante. En revanche, si l'humidité relative baisse, la teneur en eau de l'objet baisse également jusqu'à un nouveau point d'équilibre.

Pour illustrer ce concept, la Figure 1 présente un graphique des points d'équilibre de la teneur en eau par rapport à l'humidité relative pour quelques fibres textiles. On voit ainsi le genre de relation, indiqué par la configuration générale du graphique, qui existe entre le point d'équilibre de la teneur en eau et l'humidité relative. Le graphique montre également que, même parmi les textiles, il y a des différences entre la quantité d'eau qu'une fibre donnée, comme le coton, peut absorber à une humidité relative précise, et celle qu'une autre fibre, comme le nylon, peut absorber à la même humidité relative. Des matières différentes ont des propriétés différentes en matière d'absorption comme à d'autres égards. D'autres substances, comme le bois ou le cuir, pourraient donner matière à d'autres graphiques et produire des courbes de forme comparable; mais les quantités n'y seraient pas les mêmes. Le bois possède d'assez grandes qualités d'absorption, un peu comme la rayonne de viscosse de la Figure 1. Par ailleurs, les qualités absorbantes des plastiques et des métaux sont négligeables, même à des taux d'humidité relative extrêmement élevés. Dans ces matériaux non poreux, l'absorption s'arrête à la surface et, bien que l'exposition des métaux à une humidité relative de 45 ou 50% suffise pour provoquer la corrosion de leur surface, l'humidité ne représente qu'un pourcentage minime du poids total de l'objet. En conséquence, les changements causés par l'humidité relative n'entraînent que des modifications négligeables des dimensions des matières non poreuses. En outre, la pierre, par exemple un calcaire, peut être poreuse, mais sa nature fait qu'un taux d'humidité relative élevé n'y opère que des changements de dimension infimes. Pourtant, si

*On entend par hystérésis la réversibilité incomplète des courbes d'absorption. À mesure que l'on augmente l'HR, le point d'équilibre de la teneur en humidité monte. Si l'on commence ensuite à abaisser l'HR, on se rend compte que le point d'équilibre de la teneur en eau est plus élevé pour un taux d'HR donné qu'il ne l'était durant la période d'augmentation de l'HR. L'objet ne revient pas tout à fait à son état originel.

l'eau enfermée dans les pores d'objets de ce genre vient à geler, comme cela peut se produire s'ils sont exposés à l'extérieur en hiver, il peut en résulter un effritement. Les matières dites hygroscopiques comme le bois, le papier, le cuir, les tissus, etc., gonflent lorsqu'elles absorbent de l'humidité et rétrécissent lorsqu'elles en libèrent, ce qui peut causer d'importants changements de dimensions quand elles cherchent à atteindre le point d'équilibre de leur teneur en eau dans un milieu où l'humidité relative varie. Ce sont ces changements de dimensions qui créent les problèmes dont on a fait état dans l'Introduction.

La Figure 2 donne une idée de l'importance des changements de dimensions résultant de variations de l'humidité relative; il s'agit du changement de la longueur d'une peinture à l'huile qui faisait partie de l'exposition Progrès en conservation et en restauration. Les données ne correspondent pas à des conditions d'équilibre.

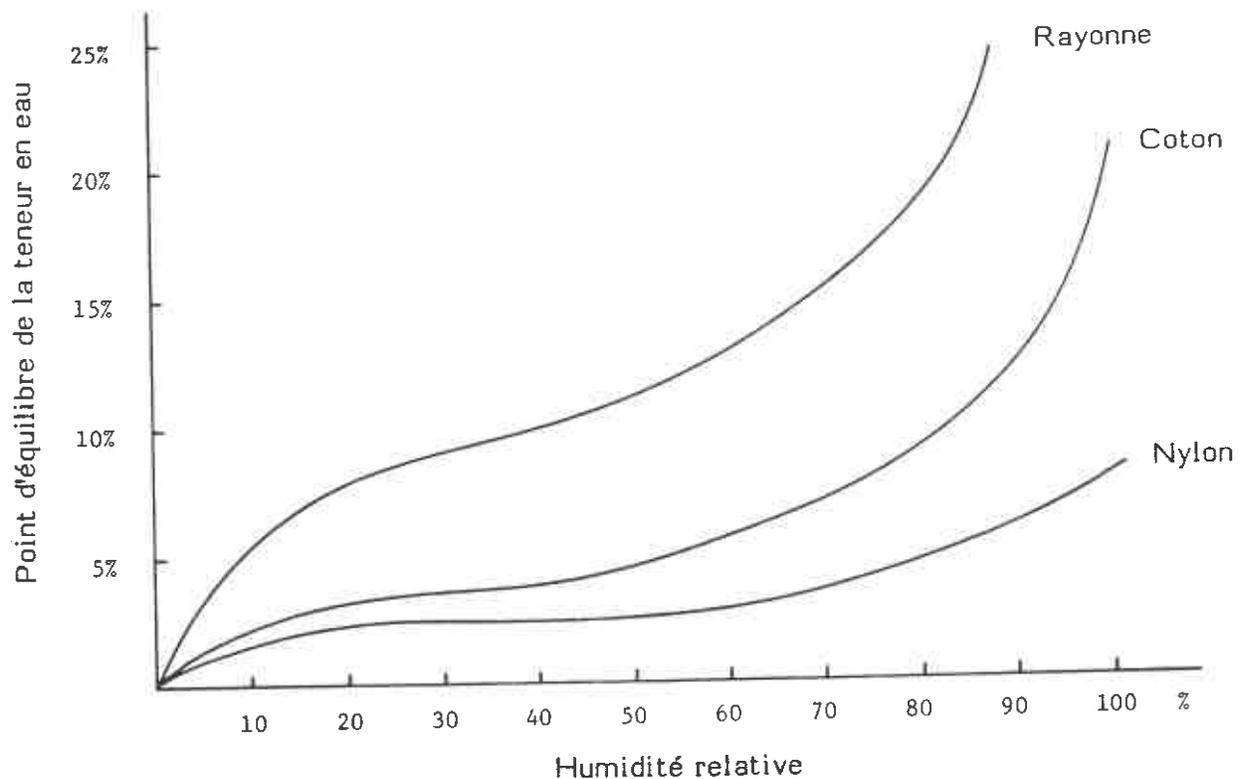


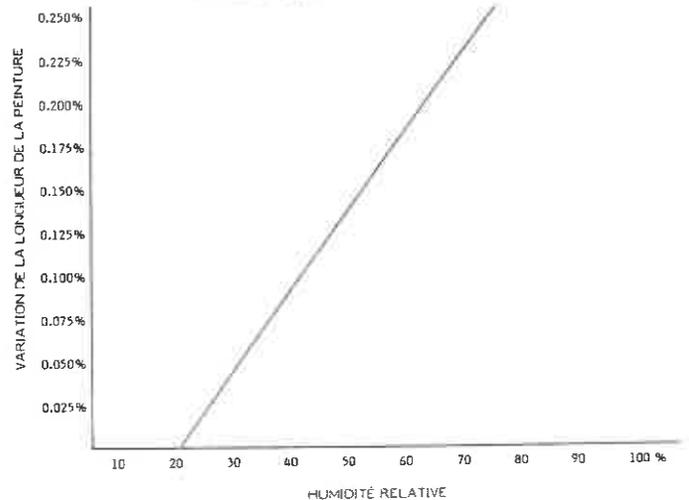
FIGURE 1 - Effet de l'humidité relative sur l'absorption de la vapeur d'eau

4. Échelles optimales d'humidité relative

Quand nous en venons à considérer l'humidité relative la plus favorable pour une collection de musée, il faut tenir compte de la nature de la collection et des facteurs détériorants. Les moisissures ont besoin d'une humidité relative élevée pour se développer. À des températures variant entre 16 et 25°C (60 et 75°F), on estime que la propagation des moisissures ne se produit qu'à un taux d'humidité relative dépassant 68%. Même à 65% d'HR, certaines espèces de moisissures pourraient se propager: aussi est-ce là le maximum d'humidité relative à maintenir dans un musée. Même à ce niveau, on risque d'avoir des moisissures. Si l'on dépasse ce niveau, le danger devient considérable; plus on le dépasse, plus le danger s'accroît.

On peut aussi aborder la détermination des échelles d'HR acceptables en étudiant des objets de bois. Ces objets ont probablement été fabriqués en bois séché à l'air et il est peu probable que ce bois ait contenu beaucoup moins de 9 à 10% d'humidité au moment de la fabrication de l'objet. Bien sûr, cela reste possible: cela dépend du bois lui-même et de la région d'où provient l'objet. Il n'en reste pas moins que la majorité des objets de bois contenaient à l'origine au moins 9 à 10% d'humidité. En théorie, on devrait toujours conserver les objets de bois à un degré d'humidité semblable à celui qu'ils avaient au moment de leur fabrication, car c'est à cette condition seulement que les joints et l'ajustement des pièces correspondront exactement à ce que l'artisan cherchait à faire. Si nous retenons donc une humidité originale de 9 à 10% comme limite inférieure raisonnable pour la plupart des objets de bois, on doit accepter un taux minimal d'environ 45% d'humidité relative dans les musées, étant donné que cette HR correspond à un point d'équilibre de la teneur en eau de 9 à 10% pour le bois. Ce que nous proposons ici, c'est un minimum général; ce faisant, nous ne voulons pas dire qu'il faudrait conserver tous les objets de bois à

FIGURE 2 - Variation de la longueur d'une peinture à l'huile selon les changements de l'humidité relative



45% d'HR. Il peut fort bien exister dans une collection des objets dont la valeur et l'histoire réclament un réglage particulièrement strict de l'humidité à un autre niveau.

Nous avons étudié isolément divers éléments d'une collection pour en arriver à une échelle d'humidité relative à l'intérieur de laquelle nous devons viser à maintenir toute la collection, c'est-à-dire entre 45 et 56% d'HR. Cependant, l'appareillage disponible et la construction particulière d'un musée peuvent ne pas nous permettre de maintenir ces conditions face aux températures extrêmes du climat canadien. Par ailleurs, s'il est impossible de régler l'humidité et que celle-ci dépasse 65% en été ou tombe à moins de 45% en hiver, on peut s'attendre à ce que les objets soient endommagés. Même dans l'échelle de 45 à 56% d'HR, des changements rapides peuvent endommager les articles particulièrement sensibles. On devrait



Détail d'une sculpture polychrome: le bois est fendillé et la peinture se détache. Collection du Musée du Québec.

maintenir la température entre 19 et 22°C (66° - 72°F). Plenderleith et Werner recommandent un taux constant d'humidité relative de 58% à 17°C (63°F) pour les tableaux de chevalet de valeur. Dans la pratique, cependant, nous tolérons une certaine variation du degré d'humidité relative pour l'ensemble de la collection et nous traitons les articles extrêmement sensibles comme des exceptions, en ayant recours à des moyens précis, par exemple l'installation d'une vitrine spéciale où l'on peut maintenir un taux d'humidité relative extrêmement stable. Même si l'on disposait d'un équipement de climatisation coûteux, permettant de maintenir une humidité relative de plus de 50% dans tout l'immeuble, il n'existe guère de bâtiments au Canada qui puissent survivre bien des hivers à un traitement de ce genre. En conséquence, nous devons accepter dans la plupart des cas une humidité relative

plus basse en hiver qu'en été, mais nous devrions viser à conserver plus de 45% et nous efforcer d'assurer un passage graduel des conditions d'été aux conditions d'hiver et vice versa. Il est clair que plus la fluctuation saisonnière est faible, plus la collection sera en sécurité. Les fluctuations quotidiennes doivent être beaucoup moins importantes que les fluctuations saisonnières. Si la nature de l'immeuble rend impossible le maintien de l'HR à 45% au milieu de l'hiver, il pourra être nécessaire d'accepter une HR minimale plus basse. Dans ce cas-là, il faudrait également abaisser le taux maximal d'humidité relative admis. Une échelle de 35 à 55% d'humidité relative pourrait être un compromis acceptable. L'essentiel est de limiter autant que possible l'échelle des fluctuations saisonnières.

5. Mesure de l'humidité relative

Lorsque nous avons défini l'humidité absolue, nous avons précisé que l'on peut soumettre l'air à l'action d'un agent déshydratant qui absorbe toute la vapeur d'eau d'un volume d'air donné, ce qui permet de peser cette eau. Nous connaissons ainsi l'humidité absolue moyenne pendant la durée de l'opération de mesure. En consultant ensuite un tableau donnant l'humidité absolue à 100% d'HR à la température en question, on peut calculer l'humidité relative. Cette méthode est valable en théorie, mais son emploi est laborieux, de sorte qu'elle n'est le plus souvent pas pratique, sauf pour certaines calibrations scientifiques.

A. Les hygromètres à point de rosée

A mesure que l'on refroidit l'air, l'humidité relative augmente jusqu'à ce qu'on atteigne une température (le point de rosée) à laquelle l'air est saturé de vapeur d'eau (l'HR est alors de 100%) et où l'eau commence à se condenser. Plus l'humidité relative de l'air est élevée au départ, moins il faut le refroidir pour arriver au point de condensation. A partir de ce principe,

on
l'hu
à p
rosé
type
d'ai
mes
En
peut
tem
a p
mer
mes
n'es
cou
une
de
de
véri
l'on
l'HR
l'hy
prél
très
exer
rela
du
hygi
mai
aver
diff
cou
envi
fabr
mes
inst
d'ét
Lab
un
envi
sont
des
psyc
B. l
cor

on a inventé un instrument de mesure de l'humidité relative qu'on appelle un hygromètre à point de rosée. Les hygromètres à point de rosée sont des instruments mécaniques de divers types avec lesquels on refroidit un échantillon d'air jusqu'au point de condensation pour ensuite mesurer la température de ce point de rosée. En consultant des tables ou des échelles, on peut trouver l'humidité relative à partir de la température du point de rosée du milieu où l'on a prélevé un échantillon. Avec un bon instrument de ce genre, un opérateur habile arrive à mesurer l'HR de façon très précise, mais ce n'est pas là un appareil dont on se servirait couramment dans un musée. Le mesurage est une opération qui demande beaucoup de temps, de soin et d'habileté. Les hygromètres à point de rosée sont utiles si l'on n'a besoin que d'une vérification ponctuelle, mais ne valent rien si l'on doit enregistrer les variations possibles de l'HR pendant une période donnée. Par contre, l'hygromètre à point de rosée permet de prélever un tout petit échantillon, ce qui le rend très utile dans des conditions particulières, par exemple lorsqu'on veut mesurer l'humidité relative d'un volume fermé, comme l'intérieur du cadre d'un tableau. On peut se procurer un hygromètre à point de rosée pour moins de \$50, mais il existe des appareils plus perfectionnés avec lesquels on peut surmonter certaines des difficultés qui se posent dans leur usage courant. La division du matériel environnemental de la EG and G Company en fabrique un qui est muni d'un dispositif de mesure thermoélectrique du point de rosée; cet instrument coûte environ \$3000. Les maisons d'études scientifiques comme la Canadian Laboratory Supplies vendent d'autres appareils un peu moins complexes au prix de \$400 environ. Cependant, les instruments de ce prix sont probablement trop coûteux pour la plupart des musées, si on les compare aux psychromètres.

B. Les psychromètres

Le psychromètre est un instrument qui comporte deux thermomètres, ce qui le fait

ressembler à l'hygromètre à point de rosée. L'un des thermomètres mesure la température de la pièce et l'autre est enveloppé dans du coton qui doit rester humide. L'eau s'évapore et amène ce dernier thermomètre à une température inférieure à celle du thermomètre à ampoule sèche. Si le milieu ambiant est à 100% d'HR, il ne se produit évidemment pas d'évaporation et la température indiquée par les deux thermomètres est la même. Par contre, plus le milieu ambiant est sec, plus l'eau s'évapore vite, plus l'ampoule humide se refroidit et plus la différence entre les deux températures mesurées est grande. Le fabricant de l'instrument fournit une table ou une échelle où figurent les niveaux d'humidité relative correspondant à des températures données. Le Tableau 2 en donne un exemple. Les tables complètes sont beaucoup plus volumineuses; par ailleurs, l'utilisateur devrait toujours se servir de celle fournie par le fabricant.

Lorsqu'on utilise un psychromètre, d'infimes courants d'air peuvent faire varier la vitesse d'évaporation autour de l'ampoule humide, ce qui peut provoquer des erreurs de mesure. Pour éviter ces difficultés, il faut assurer autour des ampoules une circulation de l'air qui soit supérieure à un point critique. Dans le cas des psychromètres de type Assman, on y arrive avec un petit ventilateur électrique. Lorsqu'on utilise un psychromètre fronde, on résout le problème en faisant tourner l'instrument autour d'un manche à une vitesse donnée pendant un laps de temps donné. La précision d'un bon instrument de type Assman est plus grande que celle d'un appareil de type fronde; par contre, les psychromètres fronde sont peu coûteux. Avec un bon psychromètre Assman, on peut mesurer l'humidité relative avec une marge d'erreur de moins de deux pour cent.

Il existe des psychromètres qui enregistrent les résultats de façon continue. Ils impriment simultanément la température du thermomètre à ampoule sèche et celle du thermomètre à ampoule humide sur des graphiques circulaires ou cylindriques.

TABLEAU 2
ÉCHANTILLON DE TABLE PSYCHROMÉTRIQUE *

Température de l'air (t) Degrés Celsius	Baisse de température du thermomètre à ampoule humide (t-t')														
	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0	98	96	94	93	91	89	87	85	83	81	80	78	76	74	73
1	98	97	95	93	92	90	88	86	85	83	81	80	78	76	75
2	98	97	95	93	92	90	89	87	85	84	82	81	79	78	76
3	98	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	82	80	78	77
4	99	97	96	94	93	91	90	88	87	85	84	82	81	79	78
5	99	97	96	94	93	91	90	88	87	86	84	83	82	80	79
6	99	97	96	94	93	92	90	89	88	86	85	84	82	81	80
7	99	97	96	95	93	92	91	89	88	87	86	84	83	82	80
8	99	97	96	95	94	92	91	90	88	87	86	85	84	82	81
9	99	98	96	95	94	93	91	90	89	88	87	85	84	83	82
10	99	98	96	95	94	93	91	90	89	88	87	86	84	83	82
11	99	98	97	95	94	93	92	91	90	89	87	86	85	84	83
12	99	98	97	96	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84
13	99	98	97	96	95	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84
14	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85
15	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85
16	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85
17	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	86
18	99	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86
19	99	98	97	96	95	95	94	93	92	91	90	89	88	87	87
20	99	98	97	96	96	95	94	93	92	91	90	89	89	88	87
21	99	98	97	97	96	95	94	93	92	91	90	90	89	88	87
22	99	98	97	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87
23	99	98	97	97	96	95	94	93	93	92	91	90	89	89	88
24	99	98	98	97	96	95	94	94	93	92	91	90	90	89	88

* Humidité relative, en pourcentage,
selon la température en degrés Celsius

Comme pour n'importe quel instrument, les résultats obtenus dépendent énormément du soin avec lequel on manipule l'appareil. Il faut suivre attentivement les indications du fabricant. On doit particulièrement faire très attention aux mèches ou aux gaines, les ajuster soigneusement à l'ampoule du thermomètre, les humecter suffisamment d'eau distillée et éviter d'y laisser des sels. Si l'on veut obtenir une mesure précise de l'HR, il faut relever la température avec précision. Comme on peut le voir dans le tableau 2, si la température de la pièce est de 20°C et qu'on note une différence

de 1, 4° entre le thermomètre à ampoule humide et l'autre à ampoule sèche, l'humidité relative s'élève à 88%. Si l'on faisait erreur en relevant une différence de 1, 5°, l'humidité relative indiquée ne serait plus que de 87%. Une erreur de 0, 1° dans le relevé de la différence de température entraîne une erreur de 1% de la mesure de l'humidité relative. Évidemment, les thermomètres doivent être précis et l'on doit les consulter avec soin. On peut se procurer un psychromètre fronde pour moins de \$25; les appareils de type Assman coûtent environ \$100.

C. Les hygromètres à cheveu

L'hygromètre le plus connu est sans doute l'hygromètre à cheveu; beaucoup de grands magasins le vendent comme appareil ménager. Le fonctionnement de ces instruments repose sur un principe dont nous avons déjà parlé, qui veut qu'un cheveu, ou une mèche de cheveux, allonge quand l'humidité relative augmente et raccourcisse à mesure que celle-ci baisse. Le changement de longueur du cheveu actionne une aiguille ou un stylet enregistreur.

Les hygromètres à cheveu ne sont pas aussi précis que les psychromètres ou les hygromètres à point de rosée: il peut s'écouler une demi-heure avant que la réaction à un changement d'humidité relative soit terminée. Toutefois, ce sont des appareils bon marché, qui donnent directement la mesure de l'humidité relative et dont n'importe qui peut se servir. Les mesures que l'on prend couramment dans les musées ne doivent pas nécessairement être précises. On veut souvent savoir si l'atmosphère du musée se situe dans une échelle d'HR acceptable; dans beaucoup de musées, l'humidité relative varie jusqu'à 10% d'un endroit à l'autre. Dans ces musées, l'hygromètre à cheveu peut se révéler satisfaisant, pourvu qu'on s'en serve en tenant compte de ses limitations. Il faut le calibrer à peu près une fois par mois avec un bon hygromètre à point de rosée ou un psychromètre. C'est dans la mesure des taux d'humidité relative variant de 30 à 80% que les hygromètres à cheveu donnent les meilleurs résultats. Les instruments les plus simples de ce type coûtent \$10 ou moins.

D. Les indicateurs à sels colorés

La couleur de divers sels de cobalt, comme le thiocyanate de cobalt, varie selon l'humidité relative. On place un morceau de papier imprégné d'un sel de ce genre dans le milieu témoin. La couleur varie du bleu au rose et on la compare à des couleurs types pour mesurer approximativement l'humidité relative. La méthode n'est pas particulièrement précise: la

marge d'erreur est d'au moins 5%. En outre, les sels ne se prêtent pas à des opérations de mesure dans de grandes pièces. Toutefois, ils sont peu coûteux et on peut s'en servir avec profit dans des vitrines fermées.

E. Hygromètres divers

Il existe des hygromètres qui font appel à d'autres principes de physique et de chimie. Par exemple, l'hygromètre à diffusion mesure la différence de pression qui s'établit entre deux réservoirs disposés de part et d'autre d'une membrane, occupés l'un par une atmosphère saturée, qu'on obtient en le remplissant partiellement d'eau distillée, l'autre par l'atmosphère qu'on étudie. Plus la différence de pression est grande, plus l'humidité relative est basse.

L'hygromètre à condensateur comporte un dispositif de mesure hygroscopique diélectrique, où la capacitance, mesurée par un compteur, indique l'humidité relative.

D'autres hygromètres exploitent la sensibilité de certaines résistances vis-à-vis l'humidité.

F. Généralités

L'Institut canadien de conservation publiera sous peu des recommandations sur divers appareils de mesure du milieu ambiant. Pour le moment, nous nous contenterons de généralités. Tous les musées, si petits soient-ils, devraient avoir les moyens de s'offrir des hygromètres à cheveu simples, qu'on peut se procurer pour \$10 ou moins. A ce prix-là, on peut en acheter quelques-uns et les disposer en différents endroits. Ces instruments permettront de déceler les grandes variations d'humidité relative qui peuvent exister entre les différentes parties de l'immeuble et les diverses saisons. Pour que les résultats soient fiables, il faut calibrer ces hygromètres à cheveu avec un bon hygromètre à point de rosée ou avec un psychromètre. La Fisher Scientific Co. Limited vend, pour moins de \$100, un psychromètre

"Psychron" Bendix, qui est un bon instrument de calibrage. A moins d'être prêt à faire de fréquentes observations avec les hygromètres à cheveu simples, tant durant les heures d'ouverture du musée qu'à d'autres moments, il est impossible de découvrir certains comportements cycliques de l'HR. Pour faire ces observations commodément, il faut avoir un hygrographe enregistreur. Un instrument comme le thermohygrographe de la R. Fuess Co., vendu par la Hughes-Owens Co., coûte environ \$700. Cet appareil enregistre la température et l'humidité relative sans arrêt pendant sept jours, après quoi il faut remplacer la bande. Il s'agit d'un instrument à cheveu, qu'on doit calibrer à l'aide d'un "Psychron". La Fisher Scientific et la Hughes-Owens ont des comptoirs de vente dans plusieurs villes au Canada.

6. Méthodes de régulation de l'humidité relative

Dans les pages suivantes, nous étudierons très brièvement les types d'appareils de régulation de l'humidité relative qui sont disponibles. Nous n'avons pas l'intention d'en traiter de façon exhaustive, mais simplement de donner aux conservateurs une idée de ce qui peut se faire. Aller plus loin allongerait démesurément ce bulletin et en réduirait l'utilité. La conception des vitrines d'exposition et la climatisation des musées sont des sujets qui méritent de faire l'objet de bulletins séparés; l'Institut canadien de conservation y veillera certainement dans ses prochaines publications.

L'idéal est un système de climatisation central bien conçu, qui permette la stricte régulation de la température et de l'humidité relative, le jour et la nuit, l'hiver et l'été. Les systèmes qui peuvent assurer une préservation suffisante des objets sont plus élaborés et plus coûteux que ceux qui se contentent d'assurer un milieu confortable aux humains. On peut augmenter l'humidité d'un air trop sec en le

faisant passer à travers un nuage de gouttelettes d'eau formées par des gicleurs ou d'autre moyens mécaniques, ou en chauffant de l'eau pour en faire de la vapeur. On peut déshumidifier un air trop humide en le faisant passer soit sur des serpentins réfrigérants, qui le refroidissent et en condensent la vapeur d'eau, soit à travers un lit de matières déshydratantes. Les musées qui peuvent se permettre un système comme celui-là devront consulter un ingénieur compétent, qui peut préciser les exigences en ce domaine, en fonction du climat extérieur, de la taille et de la disposition de l'immeuble, de la qualité de l'eau disponible, du mode de construction des murs, du type de chauffage, etc. Chaque immeuble pose des problèmes uniques, qui exigent des solutions individuelles. Bien entendu, la meilleure solution est celle qui permet, dès la construction de l'immeuble ou au cours d'une restauration majeure, de tenir compte des besoins du système de climatisation. Une fois le système installé, le musée doit employer une personne compétente pour en assurer le fonctionnement et l'entretien.

Seuls les musées les plus favorisés sont en mesure d'arriver au réglage complet du milieu ambiant nécessaire à un système de climatisation bien conçu. Cependant, les musées de moindre importance peuvent installer des humidificateurs mobiles qui augmenteront l'humidité relative, très basse pendant les mois secs de l'hiver canadien. Les humidificateurs mobiles à mèche n'ajoutent que quelques gallons d'eau par jour à l'air de la pièce; il faudrait en acheter un bon nombre pour assurer une humidification convenable. Il existe toutefois des appareils à tambour, qui coûtent moins de \$100 et qui vaporisent environ dix-sept gallons d'eau par jour. On peut aussi acheter des déshumidificateurs mobiles, à raison d'environ \$150 chacun. Selon leur grosseur, ces appareils élimineront de 14 à 24 chopines d'eau avant que l'on n'en doive renouveler l'agent déshydratant. Il existe aussi des appareils de type mécanique, qui enlèvent une quantité comparable de vapeur d'eau par un processus de condensation; il faut

alors prévoir un tuyau de vidange ou un récipient pour recueillir l'eau condensée.

Le nombre d'appareils nécessaire dépend d'un certain nombre de facteurs; la façon la plus facile de le déterminer consiste à ajouter des appareils jusqu'à ce qu'on arrive à l'humidité voulue. Il est extrêmement important d'installer des humidificateurs et des déshumidificateurs dans les réserves, ce qu'on oublie souvent lorsqu'on cherche à réduire les dépenses. Pour obtenir des résultats satisfaisants, les fenêtres doivent être scellées et les portes, bien fermées. Il est souhaitable d'installer des portes à fermeture automatique; les portes tournantes extérieures sont aussi avantageuses. On doit éviter de trop chauffer l'immeuble si l'on veut conserver en hiver un taux élevé d'humidité relative. Il faut que la température y soit aussi basse que possible tout en restant confortable, certainement moins de 22°C et de préférence moins de 20°C. Avant tout, il est nécessaire de maintenir une température et une humidité relative constantes. Il ne faut pas laisser la température baisser durant la nuit puis la faire remonter le jour, quand le musée est ouvert. Des variations quotidiennes de ce genre peuvent causer de grands dommages et sont en réalité loin d'être économiques. De toute façon, il est préférable de conserver l'immeuble à une température assez basse le jour et la nuit.

Dans beaucoup d'immeubles, il est probable que de tenter de maintenir une humidité raisonnable à l'intérieur durant les mois les plus froids de l'année risque d'endommager gravement les murs extérieurs du bâtiment: la vapeur d'eau passe à travers le mur, l'humidité élevée de l'intérieur tendant à se diffuser vers l'atmosphère plus sèche de l'extérieur. Dans les parties les plus fraîches de l'intérieur du mur, la vapeur d'eau peut se condenser et dissoudre les sels du mur lui-même. Ceux-ci produisent sur la surface extérieure une décoloration blanchâtre ou une efflorescence. En outre, la congélation de l'eau ou la précipitation des sels à l'intérieur du mur peuvent entraîner des changements de volume qui font éclater la

brique ou la maçonnerie et les font s'effriter. Au cours des périodes les plus froides, il est possible que la vapeur d'eau se condense même sur la face interne d'un mur extérieur, ce qui finit par détruire le plâtre ou le gyproc. Si l'échelle d'humidité relative qu'un immeuble donné peut tolérer est soumise à des contraintes très rigides, il peut néanmoins être possible d'abriter les objets les plus sensibles de la collection dans une pièce centrale. On peut alors maintenir l'humidité de cette pièce au niveau voulu: la présence, entre cette pièce et les murs extérieurs, d'une zone tampon efficace, où l'humidité relative est plus basse, permet de réduire les dégâts, voire même de les éviter entièrement.

Les collections contiendront toujours des objets dont la valeur est telle qu'il faut les préserver avec le plus grand soin. Si le budget est insuffisant pour permettre de régler de façon satisfaisante le milieu ambiant de tout le musée, on peut disposer ces objets dans des vitrines de verre ou de plexiglas scellées, où l'on peut régler le milieu ambiant. On peut préconditionner un gel de silice de façon à assurer le maintien de l'humidité relative voulue dans les vitrines où on le place.² Le gel de silice préconditionné est de loin la matière la plus appropriée, mais si l'on n'en a pas, on peut se servir d'une solution de sel saturée. Pour des raisons d'ordre esthétique, il peut être préférable de mettre le gel de silice ou la solution de sel sous un double fond poreux.³

K.J. Macleod a obtenu son doctorat en chimie physique à l'Université de Toronto et a travaillé 14 ans chez Alcan avant d'entrer, en 1973, à l'I.C.C., où il est chef de la Recherche sur le milieu et la détérioration.

Renvois

1. H.J. Plenderleith et P. Phillippot: "Climatologie et conservation dans les musées", Museum (Paris), xiii, 4 (1960), 201-289.
2. Pour une étude de la conception des vitrines, voir N. Stolow: "Fundamental case design for humidity sensitive museum collections". Museum News (Washington), Technical Supplement No. 11, février 1966.
3. Ibid.

Bibliographie

Les lecteurs qui voudront étudier l'hygrométrie de façon plus poussée auront intérêt à consulter l'article de H.J. Plenderleith et P. Philippot et l'ouvrage compilé par A. Wexler. Une certaine partie de la matière du présent bulletin est traitée plus brièvement dans les autres publications.

Amdur, E.J.: "Humidity control - isolated area plan", Museum News (Washington), Technical Supplement No. 6, décembre 1964, 58-60.

Buck, R.D.: "A specification for museum air conditioning", Museum News (Washington), Technical Supplement No. 6, décembre 1964, 53-57.

Keck, Caroline K. (textes réunis par): A primer on museum security, Cooperstown, N.Y., 1966.

Plenderleith, H.J., et Philippot, P.: "Climatologie et conservation dans les musées", Museum (Paris), xiii, 4 (1960), 201-289.

Plenderleith, H.J.: La conservation des antiquités et des oeuvres d'art. Paris, Eyrolles, 1966.

Stolow, N.: "Fundamental case design for humidity sensitive museum collections", Museum News (Washington), Technical Supplement No. 11, février 1966.

Wexler, A. (textes réunis par): Humidity and moisture - measurement and control in science and industry, 4 vol., New York, 1965.