

Lignes directrices sur le climat

Avis de non-responsabilité:

Les renseignements contenus dans ce document sont basés sur la compréhension actuelle des problèmes soulevés. Ils ne s'appliquent pas nécessairement à toutes les situations, et aucune des activités décrites n'assure une protection complète. Bien que des efforts raisonnables aient été faits pour s'assurer que les renseignements sont exacts et à jour, l'éditeur, l'Institut canadien de conservation (ICC), n'offre aucune garantie à cet égard et n'assume aucune responsabilité en cas de perte, de réclamation ou de revendication pouvant résulter, directement ou indirectement, de l'utilisation des renseignements ou de la confiance qui leur est accordée. L'ICC ne cautionne aucun des produits, services ou matériaux indiqués dans ce document ou sur les sites Web externes auxquels ce document pourrait renvoyer. Par ailleurs, il ne fait aucune déclaration à leur sujet. Ces produits, services ou matériaux sont donc utilisés à vos propres risques.

Le Canada s'est engagé à réduire ses émissions de gaz à effet de serre (consulter les [plans climatiques du Canada](#)). L'une des stratégies centrales de l'atteinte de cet objectif, [Un Canada propre](#), note précisément que, pour « bâtir ensemble un avenir plus propre, plus sain et plus abordable que nous pourrions être fiers de léguer à nos enfants », nous devons améliorer « [l]es codes et [l]es normes du bâtiment de façon à ce que nos maisons et immeubles consomment moins d'énergie » (Environnement et Changement climatique Canada, 2019). Les musées et les archives du monde entier sont de plus en plus critiqués pour leur mise en œuvre de lignes directrices sur le climat énergivores qui ont été créées bien avant la reconnaissance des changements climatiques et de leurs causes. En 2020, de nombreux membres de la communauté des musées et des archives s'affairaient à réexaminer leurs anciennes idées sur le contrôle du climat et à demander aux experts d'élaborer de meilleurs conseils. Les lignes directrices sur le climat sont la réponse de l'Institut canadien de conservation (ICC) à cette requête.

La présente ressource remplace la précédente ressource de l'ICC, Directives en matière d'environnement pour les musées. Elle prend en compte les spécifications les plus récentes qu'utilisent les ingénieurs en mécanique pour le contrôle du climat dans les musées et les archives. De plus, elle concilie les deux responsabilités avec lesquelles doivent composer les établissements du patrimoine, soit de réduire les risques pour les collections patrimoniales tout en agissant de manière à favoriser la durabilité.

La ressource contient deux outils et quatre sections.

ClimaSpec

[ClimaSpec](#) est un outil de recherche rapide et facile d'utilisation pour trouver les conseils de l'ICC à

propos des lignes directrices sur le climat. Après avoir sélectionné le type d'objet ou de collection que l'on souhaite préserver, l'outil fournit de brefs résumés des conseils de l'ICC. L'outil comprend deux calculateurs : un calculateur de moisissures qui estime le temps nécessaire au développement de la moisissure à différentes valeurs d'humidité relative et un calculateur de durée de vie pour les matériaux acides se trouvant dans les archives et qui se dégradent rapidement à température ambiante.

Outil de prise de décisions relatives au contrôle du climat

L'[Outil de prise de décisions relatives au contrôle du climat](#) de l'ICC est un outil rapide et facile d'utilisation pour obtenir des conseils sur le contrôle du climat dans une situation particulière. Répondez à la courte liste de questions sur votre établissement et vos collections pour obtenir des conseils de base sur le contrôle du climat.

Aperçu des lignes directrices sur le climat

La section « [Aperçu des lignes directrices sur le climat](#) » offre une description détaillée des questions que l'on doit se poser lors de la prise de décisions concernant le contrôle du climat.

Types de contrôle de l'ASHRAE

La section « [Types de contrôle de l'ASHRAE](#) » offre une description et d'une explication détaillées des implications pratiques associées à chaque type de contrôle, comme défini dans le chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries » du manuel de l'ASHRAE, dont se servent les ingénieurs en mécanique au Canada, aux États-Unis et ailleurs. L'ICC a adopté ces définitions et cette terminologie pour ses conseils en matière de contrôle du climat.

Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie

La section « [Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie](#) » offre des renseignements détaillés au sujet des deux calculateurs de ClimaSpec, notamment des équations et des sources bibliographiques pertinentes.

Glossaire des lignes directrices sur le climat

La section « [Glossaire des lignes directrices sur le climat](#) » offre une liste des principaux termes utilisés dans cette ressource accompagnés de leur définition. Certains de ces termes sont également expliqués plus en détail sur l'une des pages de cette ressource.

Aperçu des lignes directrices sur le climat

Stefan Michalski

Sur cette page:

- [Liste des abréviations](#)
- [Introduction aux lignes directrices et aux spécifications](#)
- [Objectif et limites des lignes directrices sur le climat](#)
- [Il n'existe pas de normes mais un grand nombre de lignes directrices](#)
- [Comment trouver les lignes directrices sur le climat pertinentes pour vous](#)
- [Le rôle du chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries »](#)
- [Intégration des spécifications dans la conception du bâtiment, la conception du microclimat et la durabilité](#)
- [Un climat inadéquat est un risque parmi d'autres](#)
- [Vidéos en accéléré d'une détérioration](#)
- [Annexe A : Les quatre paramètres d'une spécification relative au climat](#)
 - o [Paramètre 1 : Limites supérieures à long terme ou seuils de danger](#)
 - o [Paramètre 2 : Moyennes annuelles ou valeur de référence](#)
 - o [Paramètre 3 : Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle ou à la valeur de référence](#)
 - o [Paramètre 4 : Brèves variations et gradients spatiaux](#)
- [Annexe B : Sensibilité aux variations et application des variations démontrées](#)
 - o [Les quatre niveaux de sensibilité initiale aux variations](#)
 - o [La sensibilité initiale aux variations n'est pas une science précise](#)
 - o [Un contrat de prêt est une obligation précise](#)
 - o [L'historique de la collection et les variations démontrées](#)
 - o [La rupture par fatigue](#)
 - o [L'humidité peut réduire une variation démontrée](#)
- [Annexe C : Les temps de réaction des objets et les multiples avantages des contenants de protection](#)
 - o [Signification du temps de réaction](#)
 - o [Signification du terme « contenant de protection »](#)
 - o [Intégration des contenants dans le bâtiment et ses systèmes](#)
 - o [Temps de réaction à l'humidité relative des objets avec et sans contenants de protection](#)



- o Graphiques représentant le temps de réaction des objets en bois
- o Préoccupations concernant les variations de température touchant les contenants dans lesquels on trouve un microclimat
- o Effet de la température sur les temps de réaction
- o Équations qui sous-tendent les calculs du temps de réaction
- Bibliographie

Liste des abréviations

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ICC	Institut canadien de conservation
HR	humidité relative
k	mille
m	million

Introduction aux lignes directrices et aux spécifications

Dans la présente ressource, l'expression « lignes directrices » désigne des conseils qualitatifs et quantitatifs sur les méthodes employées pour contrôler le climat dans les musées de petite et de grande taille, que ce soit à l'aide de systèmes mécaniques, de [contenants dans lesquels on trouve un microclimat](#) ou simplement en se contentant de ne rien faire. En revanche, une spécification relative au climat est un ensemble numérique d'objectifs en matière de rendement requis par les concepteurs de systèmes (généralement de systèmes de contrôle mécanique, mais parfois de vitrines d'exposition, de caisses d'expédition, etc.).

Les spécifications relatives au climat pour les musées ont toujours été complexes et sujettes à débat, et elles le sont encore aujourd'hui. En effet, elles peuvent avoir des répercussions importantes sur le budget général d'un musée ainsi que sur son budget carbone, un aspect dont on doit de plus en plus tenir compte. Les spécifications relatives au climat sont habituellement destinées aux seuls concepteurs de systèmes mécaniques, mais l'atteinte de ces objectifs à long terme ne sera possible et durable que si un musée intègre la conception de ses systèmes mécaniques à celle de son bâtiment et de ses contenants dans lesquels on trouve un microclimat. Dans de nombreux scénarios, ce sera le bâtiment seul ou les contenants seuls qui permettront de respecter les spécifications de manière fiable. Lors de la prise de décision concernant la régulation du climat, on doit prendre en compte les trois éléments suivants : l'enveloppe du bâtiment, les systèmes mécaniques et les contenants dans lesquels on trouve un microclimat.

Objectif et limites des lignes directrices sur le climat

Le climat à proximité d'un objet (c'est-à-dire la température et l'[humidité relative \[HR\]](#) ambiantes) a parfois un effet important sur la préservation de l'objet, alors que dans certaines situations, ce n'est pas le cas. Pour certains objets, c'est la température qui importe le plus; pour d'autres, c'est l'HR. Parfois, ce sont les conditions moyennes qui sont plus importantes. À d'autres moments, ce sont les variations de ces conditions qui importent. Un même objet peut comporter de nombreux composants, chacun ayant des exigences relatives au climat qui peuvent être contradictoires. Une même collection peut contenir de nombreux types d'objets différents. Au bout du compte, vous devez vous demander quelle est l'importance de ces effets sur les objets et quelle est la perte de valeur qu'ils entraînent. Il est compliqué de déterminer le climat dont une collection a réellement besoin.

Par ailleurs, le personnel et les visiteurs sont à l'origine d'une deuxième liste d'exigences relatives au climat, car ceux-ci souhaitent bénéficier d'un certain confort. De plus, le bâtiment, qui constitue bien souvent une partie, voire la plus grande partie de l'actif patrimonial, est au cœur d'une troisième liste d'exigences relatives au climat.

Enfin, une quatrième liste d'exigences, qui était jusqu'à tout récemment invisible, provient de notre planète. Toute tentative d'un établissement de maintenir un climat particulier nécessitera du temps, de l'argent et, surtout, de l'énergie, autant d'éléments qui entrent en contradiction avec la durabilité de notre planète et la nécessité de limiter les changements climatiques.

Les lignes directrices sur le climat pour les établissements du patrimoine sont une tentative de satisfaire aux besoins associés à ces quatre éléments : la collection, les personnes, le bâtiment et la planète. Essayer de répondre à toutes les exigences possibles est généralement sans espoir, car peu d'entre elles se recoupent. Par conséquent, répondre à ces exigences devient alors une affaire humaine, puisque les différents intervenants défendent leurs propres ensembles d'exigences. La seule approche possible est de tenter de définir les exigences essentielles relatives au climat des quatre éléments (Michalski, 1998), puis d'y satisfaire.

Dans le cadre d'une [gestion des risques](#), il faut prendre de telles décisions en demandant à chaque groupe quel serait, à leurs yeux, le pire scénario plutôt que le meilleur. Autrement dit, il faut trouver une spécification relative au climat qui réduit au minimum les risques dans l'ensemble. Le défi que pose cette approche est qu'elle ne peut être appliquée de manière générale avec précision. Les risques pour la collection, le bâtiment, les occupants et la planète reposent tous sur des jugements de valeur. Il s'agit en fait de penser aux risques et de leur accorder de la valeur de manière globale, mais tout en agissant et en leur accordant de la valeur de manière locale.

Il n'existe pas de normes mais un grand nombre de lignes directrices

De nombreuses organisations, tant des organismes de normalisation que des associations professionnelles, ont publié des lignes directrices sur le climat. Pour obtenir un examen récent de leurs différences et de l'histoire de leurs origines, consulter Michalski (2016).

Les spécifications et les lignes directrices sur le climat pour les musées et les archives sont parfois appelées, à tort, « normes sur le climat ». À la différence des codes du bâtiment, qui répondent à des préoccupations liées à la sécurité, il n'existe pas de normes juridiquement contraignantes pour le contrôle du climat dans les établissements du patrimoine. Il existe, cependant, des contrats légaux entre les établissements prêteurs et emprunteurs qui incluent généralement des spécifications relatives au climat à respecter. Pour certains programmes du gouvernement, comme le programme [Désignation pour les établissements et les administrations publiques](#) ou le [Programme d'indemnisation pour les expositions itinérantes au Canada](#), la désignation dépend du respect d'une spécification particulière relative au climat.

Comment trouver les lignes directrices sur le climat pertinentes pour vous

Pour entamer le processus de sélection d'une ligne directrice sur le climat, il convient de commencer en consultant [ClimaSpec](#). Cet outil de recherche fournit des renseignements précis sur les effets de la température et de l'HR pour chaque type d'objet. Il fournit des lignes directrices pour le contrôle du climat ainsi que des spécifications possibles liées au climat (selon la nomenclature utilisée dans le manuel de l'*ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications*). ClimaSpec dispose également d'un calculateur de moisissures et d'un calculateur de durée de vie (pour en savoir plus, consulter la page [Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie](#)). En complément des conseils sur le climat, ClimaSpec fournit des renseignements sur les effets des polluants et leur contrôle, dans la mesure où la filtration de l'air fait toujours partie d'un système de contrôle du climat.

Une fois que vous aurez utilisé ClimaSpec, vous constaterez peut-être que votre collection contient plusieurs catégories différentes d'objets en ce qui a trait à la [sensibilité](#) aux variations. Vous vous demanderez peut-être aussi comment une [désignation d'établissements et d'administrations publiques](#) ou la participation au [Programme d'indemnisation pour les expositions itinérantes au Canada](#) influencera vos décisions en matière de contrôle du climat. L'Outil de prise de décisions relatives au contrôle du climat pose une série de questions afin de vous orienter vers des conseils précis, liés à une ligne directrice sur le climat.

Le rôle du chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries »

Depuis la parution de la première édition du *manuel de l'ASHRAE* en 1999, l'Institut canadien de conservation (ICC) utilise le chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries » comme principale source de spécifications relatives au contrôle du climat. Le *manuel de l'ASHRAE* est le principal manuel de référence des ingénieurs en mécanique au Canada et aux États-Unis, ainsi que dans de nombreux autres pays. Des comités d'experts techniques rédigent ses chapitres au terme de discussions et par consensus, puis le fruit de leur travail est examiné par les membres de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Lors de la rédaction du chapitre original en 1999, le comité technique comprenait des membres du personnel de l'ICC. L'objectif de l'ICC et du comité chargé de rédiger le chapitre était de rédiger des lignes directrices auxquelles les ingénieurs et la communauté du patrimoine pouvaient se fier. L'une des innovations les plus importantes de ce comité, les niveaux de contrôle (désormais appelés « types de contrôle ») désignés AA, A, B, C et D, ont depuis été largement adoptés par la communauté du patrimoine.

Au cours des 20 années séparant les éditions de 1999 et de 2019 du manuel, le contenu des chapitres sur la température et l'HR est demeuré inchangé, mais la question de la durabilité – environnementale, économique et financière – a obligé la réflexion sur le contrôle du climat à évoluer davantage, non seulement dans notre domaine mais dans tout le secteur du patrimoine. Cette évolution est évidente tout au long de l'édition de 2019. L'adoption d'une perspective axée sur la gestion des risques est devenue essentielle. Quels sont nos objectifs de préservation, et quels sont les coûts et les avantages associés à chaque type de contrôle?

Pour l'édition de 2019, le comité chargé de rédiger le chapitre sur les musées, les archives et les bibliothèques a entièrement révisé ce dernier, notamment en commençant par l'ajout d'une introduction sur la gestion des risques et en mettant de l'avant la sélection d'une moyenne annuelle aussi efficace que possible sur le plan énergétique (durable). Celle-ci a remplacé la ligne directrice universelle privilégiant le maintien d'une HR de 50 % et d'une température de 20 °C, ce qui était souvent une source de gaspillage. Les catégories AA, A, B, C et D sont toujours en place, bien que légèrement modifiées. On a révisé les sous-types de mise en réserve à basse température (frais, froid et sous le point de congélation) de manière qu'ils soient conformes aux récentes lignes directrices de l'Organisation internationale de normalisation et de l'[Image Permanence Institute](#) (IPI; en anglais seulement). On a classé, dans une catégorie distincte, les spécifications relatives aux espaces d'exposition temporaires et aux espaces de déballage pour les objets prêtés. (Les sections sur la pollution et la conception des systèmes ont également été entièrement révisées.) Comme en 1999, des membres du personnel de l'ICC ont fait partie du comité en 2019, et l'ICC endosse pleinement le contenu de l'édition de 2023 qui était disponible au moment de la rédaction de cette ressource.

Bien que l'ICC recommande à toute personne engagée dans un projet exigeant de prendre des décisions en matière de contrôle du climat de se procurer un exemplaire du chapitre le plus récent

du *manuel de l'ASHRAE*, la présente ressource fournit des explications concernant toutes les questions clés. La page sur les types de contrôle de l'ASHRAE résume les spécifications relatives au climat de l'ASHRAE, et ClimaSpec fournit des recommandations précises concernant des groupes d'objets individuels.

Intégration des spécifications dans la conception du bâtiment, la conception du microclimat et la durabilité

Comme le souligne le *manuel de l'ASHRAE*, on ne peut pas choisir un objectif de conception pour les systèmes mécaniques sans d'abord tenir compte du climat local, de l'enveloppe du bâtiment et de l'utilisation de contenants dans lesquels on trouve un microclimat. La présente ressource n'a pas pour but d'examiner en détail ces questions, mais on peut les résumer comme suit.

Pour toute collection, qu'il s'agisse de planifier la conception d'un nouveau bâtiment ou de travailler dans un ancien bâtiment, il faut tenir compte des éléments suivants :

- utiliser ClimaSpec pour connaître le climat dont votre collection a réellement besoin et les dommages que celle-ci pourrait subir si ces exigences ne sont pas respectées;
- du point de vue de la gestion des risques, déterminer ce que ces dommages éventuels signifient pour la collection en matière de perte de valeur. Déterminer ce qui est acceptable et ce qui ne l'est pas. Cela varie en fonction du mandat de l'établissement et de ses éventuelles obligations légales. Quel équilibre souhaitez-vous établir entre la préservation, l'accessibilité et votre budget? Consulter « Étape 1 : Établir le contexte » dans [La méthode ABC pour appliquer la gestion des risques à la préservation des biens culturels](#).

Si l'on planifie la conception d'un nouveau bâtiment, il faut tenir compte des éléments suivants :

- s'assurer de bien comprendre le chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries » du *manuel de l'ASHRAE* et la présente ressource en ligne, et s'assurer qu'il en est de même du personnel et des consultants;
- considérer la durabilité comme une question de conception fondamentale qui fait partie d'une perspective gagnant-gagnant, plutôt qu'un complément pouvant être sacrifié lors d'inévitables coupes budgétaires;
- reconnaître le rôle des contenants dans lesquels on trouve un microclimat, en particulier dans la réduction des temps de réaction aux variations et à l'exposition aux polluants (consulter [Annexe C : Les temps de réaction des objets et les multiples avantages des contenants de protection](#)). Il faut intégrer ces avantages dans la conception du bâtiment et de ses systèmes mécaniques.

Si l'on travaille dans un bâtiment existant, il faut tenir compte des éléments suivants :

- appliquer les derniers outils de gestion de l'énergie au bâtiment et à ses systèmes pour obtenir non seulement des économies d'énergie, mais aussi une amélioration du rendement et de la fiabilité. Pour effectuer un suivi énergétique de base et une analyse comparative, on peut envisager d'utiliser l'[ENERGY STAR Portfolio Manager](#). [RETScreen](#) est un outil plus avancé offert par Ressources naturelles Canada, qui comprend des fonctions supplémentaires pour les évaluations de faisabilité et l'analyse du rendement des installations. Des cours de formation RETScreen sont offerts par l'Institut canadien de formation en énergie (CIET) et des ressources gratuites sont accessibles sur la chaîne [YouTube Apprentissage virtuel RETScreen](#);
- reconnaître que les contenants dans lesquels on trouve un microclimat jouent un rôle pratique encore plus important dans la régulation du climat lorsque l'ensemble de l'espace ne peut être amené aux conditions souhaitées, notamment en réduisant les temps de réaction aux variations et à l'exposition aux polluants (consulter [Annexe C : Les temps de réaction des objets et les multiples avantages des contenants de protection](#)). Il faut intégrer ces avantages dans la conception du bâtiment et de ses systèmes mécaniques;
- reconnaître que le concept de « [variation démontrée](#) » est particulièrement efficace lorsqu'il s'agit de prendre des décisions sur le contrôle durable du climat pour les collections permanentes. Si les collections se trouvent au même endroit depuis de nombreuses années et que le même schéma de variations du climat se produit chaque année, les pires fissures et déformations pouvant être causées par ce schéma de variations se sont déjà produites. Ce concept est décrit plus en détail à l'[Annexe B : Sensibilité aux variations et application des variations démontrées](#) ainsi que dans [Agent de détérioration : humidité relative inadéquate](#).

Un climat inadéquat est un risque parmi bien d'autres

L'ICC a procédé à des évaluations exhaustives des risques dans cinq établissements du patrimoine afin de dégager des tendances communes en matière de risques. Dans les deux maisons historiques et le musée de beaux-arts, les trois principaux risques dégagés pour les collections (et pour le bâtiment s'il fait partie de l'actif patrimonial) n'incluaient pas un climat inadéquat. En général, les principaux risques étaient liés aux incendies, aux dégâts causés par l'eau et aux forces physiques (Karsten et coll., 2012). Dans les archives provinciales et le musée des sciences et de la technologie, cependant, une température incorrecte constituait un risque important en raison de la détérioration rapide de certains documents photographiques et du papier acide conservés à température ambiante.

Les petits musées situés dans des bâtiments historiques qui ont été exploités pendant de nombreuses années sans système de contrôle du climat particulier décident parfois de faire l'acquisition d'un système de contrôle du climat de qualité muséale. Lorsqu'une collection permanente est en place depuis des décennies et qu'elle n'a jamais reçu de traitement de

conservation, on peut supposer que les pires fissures et déformations qui peuvent être causées par des variations de température et d'HR se sont déjà produites. Si, toutefois, on sait que le climat du bâtiment du musée s'est détérioré récemment, il faut alors analyser ce qui a changé et se demander pourquoi et comment on pourrait revenir à la situation antérieurement éprouvée et non menaçante. Certaines formes de climat inadéquat continuent de causer des dommages aux collections. Par exemple, après un certain temps, l'humidité provoquera l'apparition de moisissures, phénomène que l'on peut estimer en utilisant le Calculateur de moisissures de ClimaSpec. Les causes et les solutions liées à l'humidité sont illustrées à la figure 5 dans [Agent de détérioration : humidité relative inadéquate](#).

Les polluants peuvent être considérés comme une forme de climat inadéquat, et la filtration de l'air fait généralement partie d'un système de contrôle du climat. Comme c'est le cas de l'humidité, les polluants causent des dommages qui s'accumulent au fil du temps. Les causes et les solutions liées aux polluants sont décrites dans [Agent de détérioration : polluants](#).

Vidéos en accéléré d'une détérioration

La plupart des processus de détérioration attribuables à une température ou à une HR inadéquate sont lents. Il faut des jours, voire des semaines pour qu'ils se manifestent. Pour démontrer certains de ces processus, l'ICC a créé des [vidéos en accéléré qui illustrent certains des phénomènes de détérioration](#).

Annexe A : Les quatre paramètres d'une spécification relative au climat

Paramètre 1 : Limites supérieures à long terme ou seuils de danger

Les limites supérieures à long terme sont des seuils de danger en termes d'HR et de température au-delà desquelles les collections mixtes risquent d'être davantage endommagées. Lorsqu'on choisit une moyenne annuelle (valeur de référence) éloignée des valeurs traditionnelles de 50 % d'HR et de 20 °C et que l'on combine cette valeur de référence avec les ajustements saisonniers suggérés, la gamme de températures et d'HR qui en découle peut dépasser ces seuils de danger pour une collection mixte. Ce phénomène est illustré à la figure 15 du chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries » du *manuel de l'ASHRAE*. Les types de contrôle C et D de l'ASHRAE sont définis uniquement en fonction de leurs limites supérieures à long terme.

Les phénomènes de détérioration particuliers qui déterminent l'établissement des seuils de danger sont examinés dans les sections suivantes.

Moisissures

Bien qu'il ne soit pas possible d'éviter la présence des espèces courantes de bactéries et de moisissures, on peut prévenir les conditions d'humidité qui favorisent leur croissance. Les bactéries ont besoin d'une HR proche de celle des conditions mouillées (HR de plus de 99 %), mais les moisissures peuvent se développer lorsque l'HR est aussi faible que 65 %. Des données détaillées sur la relation entre l'HR et la croissance des moisissures sont présentées à l'aide d'un graphique sur la page Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie. ClimaSpec utilise des équations dérivées de ces graphiques pour calculer le nombre de jours nécessaire à la croissance de moisissures à différentes valeurs d'HR.

Durée de vie des matières organiques en cours de dégradation chimique

Comme nous le verrons plus loin dans la section [Moyennes annuelles ou valeur de référence](#), certains objets se dégradent rapidement à des températures confortables pour les humains, alors que d'autres se dégradent moyennement rapidement et d'autres encore, très lentement. Ces taux de dégradation doublent tous (approximativement) à chaque augmentation de 5 °C. Dans le *manuel de l'ASHRAE*, on conseille des limites maximales pour chaque type de contrôle afin de mettre en garde contre le fait que tout ce qui est organique dans les collections mixtes durera moins de la moitié, ou moins d'un quart, de sa vie lorsque les températures dépassent ces limites. Pour certains matériaux en particulier, lorsque c'est possible, ClimaSpec fournit des conseils plus précis sur les limites supérieures que ceux donnés dans le chapitre de l'ASHRAE.

Dégradation chimique des métaux et des minéraux

L'humidité provoque et accélère la corrosion des métaux et la désintégration de nombreux minéraux. La dépendance à l'égard de l'humidité fait généralement un saut soudain à un taux d'HR critique en raison de l'hydratation ou de la [déliquescence](#) d'un sel, de sorte que les valeurs d'HR critiques deviennent des seuils de danger. Lorsqu'elles existent, ClimaSpec fournit ces valeurs critiques d'HR afin de fournir des seuils de danger particuliers pour les métaux et les minéraux.

Transformations physiques

Certains matériaux se ramollissent, voire fondent, à des températures suffisamment élevées. D'autres deviennent plus cassants et fragiles à des températures suffisamment basses. Consulter [Agent de détérioration : température inadéquate](#) pour obtenir un aperçu de ces valeurs et ClimaSpec pour en savoir plus sur des objets en particulier. Pour certains objets patrimoniaux, ces températures dommageables se situent dans la fourchette de températures auxquelles ils peuvent être exposés à l'extérieur, et souvent à l'intérieur.

Paramètre 2 : Moyennes annuelles ou valeur de référence

Les valeurs de température et d'HR confortables pour les humains ne sont pas nécessairement appropriées pour la préservation des collections. Des conditions plus fraîches et plus sèches permettent de préserver tous les matériaux plus longtemps, mais elles sont inconfortables pour les gens. De plus, le maintien de conditions fraîches ou sèches en été consomme beaucoup d'énergie. Toute décision relative au contrôle du climat doit tenir compte du large éventail de durées de vie des objets d'une collection typique et doit trouver un équilibre entre le confort humain et la durabilité.

Durée de vie des matériaux organiques en cours de dégradation chimique

La recommandation de référence annuelle suppose qu'un établissement souhaite que ses collections restent dans un bon état de préservation pendant au moins un siècle, voire plus. Les matériaux naturels tels que le bois, le coton et le lin peuvent être conservés pendant des milliers d'années dans des conditions ambiantes normales, mais seulement s'ils n'ont pas été acidifiés lors de leur fabrication ou de leur exposition à des polluants. En revanche, en quelques décennies, les papiers acides deviennent bruns et cassants (consulter [Le soin des objets de papier](#)); les reliures en cuir acidifiées se désintègrent; les pellicules et les cassettes audio et vidéo deviennent collantes, racornies et impossibles à lire (consulter [Le soin des supports d'enregistrement audio, vidéo et de données](#)); et les plastiques, comme le celluloid, et la mousse de polyuréthane jaunissent et se désintègrent (consulter [Le soin des plastiques et des caoutchoucs](#)).

L'hydrolyse acide est le principal mécanisme de dégradation de tous ces matériaux particulièrement instables sur le plan chimique, et ce processus a besoin d'humidité pour se produire. La vitesse de dégradation de ces matériaux diminue d'un facteur d'environ deux pour chaque baisse de température de 5 °C et d'un autre facteur d'environ deux pour chaque réduction de moitié de l'HR. Il est possible d'estimer précisément la durée de vie restante d'un objet, selon divers scénarios de température et d'HR, à l'aide du Calculateur de durée de vie de ClimaSpec. Tout le contexte technique nécessaire pour effectuer de tels calculs est contenu dans la page Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie.

Confort humain

La présente ressource est axée sur la préservation des collections et la durabilité de la solution de conception dans un environnement muséal, et non sur le confort humain. Bien entendu, le cahier des charges final d'un projet doit trouver un équilibre entre le confort humain et les risques et avantages pour la collection (et la durabilité). Des compromis très différents peuvent être faits dans les espaces

d'exposition et dans les réserves au chapitre de la température et de l'HR. Les contenants permettent de contrôler l'HR d'objets particuliers de sorte que celle-ci n'est pas la même que dans la pièce.

Climat local et capacité de l'enveloppe du bâtiment

Le climat local et les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment déterminent la faisabilité et la durabilité de tout objectif de contrôle du climat. Ces aspects ont été plus fortement mis de l'avant dans les éditions de 2019 et de 2023 du chapitre pertinent du *manuel de l'ASHRAE* que dans les éditions précédentes. La valeur de référence annuelle sélectionnée pour la température et l'HR, combinée aux ajustements saisonniers, déterminera la taille des systèmes de contrôle du climat et leur consommation d'énergie.

Paramètre 3 : Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle ou à la valeur de référence

Les ajustements saisonniers sont des modifications intentionnelles des paramètres de température et d'HR conçues pour réduire la consommation d'énergie en hiver et en été. Les ajustements saisonniers sont courants dans les petits musées, mais étaient considérés comme peu souhaitables et inappropriés pour les grands établissements. Cette attitude a évolué en faveur de la durabilité. Les éditions de 2019 et de 2023 du chapitre du *manuel de l'ASHRAE* soulignent que les considérations de durabilité devraient jouer un rôle beaucoup plus important dans les décisions relatives aux ajustements saisonniers, quelle que soit la taille de l'établissement.

Paramètre 4 : Variations brèves et gradients spatiaux

Les variations à court terme, ou simplement les variations brèves, peuvent être causées par la mise en marche et l'arrêt du système mécanique de contrôle du climat de nombreuses fois par jour, par le cycle nuit-jour ou par les effets de la météo à l'extérieur du bâtiment. Les variations brèves peuvent être involontaires, comme dans le schéma typique en dents de scie associé à un système simple qui s'allume et s'éteint, ou intentionnelles, comme dans un système complexe conçu avec une zone tampon entre des processus opposés, comme le chauffage et le refroidissement ou l'humidification et la déshumidification. Le mot « bref » n'était pas défini dans les éditions de 1999 à 2015 du chapitre du *manuel de l'ASHRAE*, et les utilisateurs demandaient souvent des précisions à ce sujet. Dans les éditions de 2019 et de 2023, on a ajouté la note suivante : « Une variation brève désigne toute variation plus courte que les durées précisées [...] pour le taux d'ajustement saisonnier (c'est-à-dire 30 jours pour les variations de l'humidité relative et 7 jours pour les variations de température) » [traduction libre] (ASHRAE, 2023).

Les gradients spatiaux désignent le changement d'HR et de température qui se produit entre un mur ou un plancher chaud ou froid et les conditions ambiantes moyennes dans la pièce. Ils désignent également la variation entre les bouches d'alimentation en air et les bouches de reprise d'air. Bien

entendu, dans les systèmes réels, ces gradients sont inévitables et souvent importants. Cette spécification ne vise pas tous les endroits de la pièce, mais uniquement les endroits où sont conservées les collections. Elle n'a pas pour but de conduire à des conceptions présentant des taux de renouvellement d'air exceptionnellement élevés et une consommation d'énergie importante. Il s'agit plutôt d'encourager l'adoption du plus grand nombre possible de caractéristiques de conception passive qui réduisent les gradients (par exemple, une grande isolation de l'enveloppe, une bonne distribution du mouvement de l'air, ainsi qu'une séparation adéquate des accessoires et des objets de collection des sources évidentes de tels gradients). Ces conseils s'appliquent aussi bien aux systèmes simples dans les bâtiments historiques qu'aux installations spécialisées dotées de systèmes sophistiqués. Consulter les figures 5 et 6 dans [Agent de détérioration : humidité relative inadéquate](#).

Une panne du système est un risque plus important que les variations courantes

Du point de vue de la gestion des risques, les variations les plus importantes sont les variations extrêmes occasionnelles causées par une panne de système, comme une HR très basse due à une défaillance du système d'humidification pendant un hiver froid ou une humidité élevée en été due à une climatisation défectueuse. Un événement extrême d'HR survenant une fois tous les 30 ans est beaucoup plus dommageable pour une collection non emballée qu'une augmentation modeste de l'ampleur des variations brèves ayant lieu tout au long de ces 30 ans. La fiabilité à long terme demeure une préoccupation secondaire dans de nombreuses conceptions de systèmes mécaniques, et un exemple où les contenants, comme l'emballage des objets à l'épreuve de l'humidité et les armoires scellées, jouent un rôle essentiel dans la gestion des risques liés aux collections.

Consulter [Annexe C : Les temps de réaction des objets et les multiples avantages des contenants de protection](#).

La sensibilité aux variations et la variation démontrée

La sensibilité des objets aux variations de l'HR et de la température a été la question la plus sujette à débat lors de la définition des spécifications relatives au contrôle du climat, et elle devient souvent un obstacle lorsqu'on souhaite prendre des décisions visant à rendre le contrôle du climat plus durable. La question de la sensibilité des objets et le rôle de l'histoire dans l'établissement d'une variation démontrée sont abordés plus en détail à l'[Annexe B : Sensibilité aux variations et application des variations démontrées](#).

Annexe B : Sensibilité aux variations et application des variations démontrées

Les quatre niveaux de sensibilité initiale aux variations

Dans les publications précédentes, nous avons utilisé de manière interchangeable les termes « [vulnérabilité](#) » et « sensibilité ». Dans le présent document, la sensibilité désigne la réaction physique d'un objet à un agent de détérioration (par exemple, une rupture due aux variations de l'HR), tandis que la vulnérabilité désigne la perte de valeur qui en découle et qui dépend de nombreux autres facteurs.

Par « sensibilité initiale », l'ICC entend le niveau de sensibilité d'un objet aux variations de température et d'HR à partir du jour de sa fabrication (en supposant qu'il ait atteint l'équilibre avec l'HR locale), avant toute variation. Une fois que l'objet a été exposé à certaines variations, on dit qu'il a été « démontré » à cette ampleur de variation, et qu'il n'est plus sensible à des variations moins extrêmes (Michalski, 1993 et 2007). En revanche, si les fissures d'un objet ont été colmatées, l'objet revient à un nouvel état initial, dit « non démontré ».

Des objets différents n'ont pas les mêmes niveaux de sensibilité aux variations de température et d'HR. Le niveau de sensibilité initiale (avant toute exposition aux variations) est déterminé par les quatre facteurs suivants :

- La quantité de dilatation et de contraction des composants réactifs pour une ampleur de variation donnée (coefficient de dilatation).
- L'élasticité des composants affectés, qui dépend de l'âge du matériau ainsi que de la température et de l'HR avant la variation.
- La géométrie des composants assemblés. Les composants réactifs sont-ils retenus ou, pire encore, les composants faibles et cassants sont-ils fixés à des composants solides et réactifs?
- L'inégalité de l'épaisseur des composants soumis à des contraintes ou de leur fixation à des composants de retenue, ce qui entraîne une concentration localisée des contraintes.

À des fins pratiques, les objets dont les matériaux réagissent à l'HR peuvent être répartis en quatre catégories, chacune étant deux fois plus sensible aux variations que la précédente, comme le montre le tableau 1.

Tableau 1 : Les quatre niveaux de sensibilité initiale aux variations de l'HR (objets n'ayant pas été exposés à des variations depuis leur fabrication ou depuis leur remise en place)

	Sensibilité faible (la moitié ou moins de la sensibilité moyenne)	Sensibilité moyenne	Sensibilité élevée (le double de la sensibilité moyenne)	Sensibilité très élevée (le double de la sensibilité élevée)
Type d'assemblage et défauts des composants	Composants libres de se mouvoir les uns par rapport aux autres	Retenue uniforme des composants (fixation répartie) et absence d'encoches	Retenue inégale d'un élément ou retenue uniforme plus encoches	Retenue inégale et mouvement localisé, comme une couche de peinture ou un placage sur un joint de bois mobile
Concentration approximative des contraintes	×1/2 ou moins	×1	×2	×4
Dommages à ±40 % d'HR	Aucun dommage à dommages légers	Dommages légers à graves (point de référence 1)	Dommages graves (point de référence 2)	Dommages très graves
Dommages à ±20 % d'HR	Aucun dommage à dommages minimes	Aucun dommage à dommages légers	Dommages légers à graves	Dommages graves
Dommages à ±10 % d'HR	Aucun dommage	Aucun dommage à dommages minimes	Aucun dommage à dommages légers	Dommages légers à graves
Dommages à ±5 % d'HR	Aucun dommage	Aucun dommage	Aucun dommage à dommages minimes	Aucun dommage à dommages légers

Les quatre rangées inférieures du tableau 1 indiquent le degré de dommage prévu selon diverses combinaisons de variation de l'HR (rangées) et de sensibilité des objets (colonnes). Le degré de dommage est déterminé par extrapolation à partir de la cellule qui contient le « point de référence 1 ». Le point de référence 1 se fonde sur des observations courantes de même que sur des données probantes expérimentales montrant que les matériaux réactifs retenus de manière uniforme ne se fissureront probablement pas en un cycle avant que l'humidité ne passe d'une valeur moyenne proche de 50 % d'HR (courante en été au Canada) à une valeur très basse d'environ 10 % d'HR (courante dans les bâtiments chauffés en hiver). Les panneaux de bois retenus uniformément sur leurs bords, les peintures à l'huile sur des toiles avec des couches uniformes de peinture retenues uniformément par un châssis simple ou les peaux tendues uniformément dans un kayak ou un oumiak sont des exemples de matériaux réactifs retenus de manière uniforme.

De plus, on peut observer que lorsque des fissures ou des déchirures se produisent (dommages graves), elles sont situées au niveau de défauts ou d'encoches, ce qui correspond à la cellule qui contient le « point de référence 2 ». Le contenu du reste du tableau est extrapolé à partir de ces points de référence.

On notera que chaque rangée diagonale de cellules (du haut à gauche au bas à droite) prédit le même degré de dommage. Cela s'explique par le fait que ces diagonales relient des cellules de contrainte égale : lorsqu'on descend d'un cran dans le tableau, l'ampleur de la variation est divisée par deux; lorsqu'on se déplace d'un cran vers la droite, la concentration de la contrainte double. Pour les mêmes raisons, chaque diagonale présente une contrainte double de celle de sa voisine de gauche.

Le tableau 1 omet quatre corrections connues des contraintes créées par les variations, mais ces corrections ne modifieraient pas les quatre grandes catégories de sensibilité. En outre, les quatre corrections tendent à faire en sorte que les conseils fournis par le tableau 1 soient plus conservateurs. Voici ces quatre corrections :

- Les contraintes appliquées sur le bois, le cuir, le papier, les plastiques, les revêtements, etc., se relâchent avec le temps, de sorte que les variations très lentes entraînent une diminution de l'intensité des contraintes. Consulter Michalski (2007) pour en savoir plus.
- Les objets mettent du temps à réagir aux variations. Ainsi, si une variation est plus courte que le temps de réaction d'un objet, la contrainte sera moins importante que prévu. Ce point est abordé plus en détail à l'[Annexe C : Les temps de réaction des objets et les multiples avantages des contenants de protection](#).
- Le phénomène d'hystérésis qui se produit lors des variations de l'HR signifie qu'une variation de ± 20 % de l'HR entraîne moins de la moitié de la variation dimensionnelle associée à une HR de ± 40 %, qu'une variation de ± 10 % de l'HR entraîne moins de la moitié de la variation dimensionnelle associée à une HR de ± 20 % et qu'une variation de ± 5 % de l'HR entraîne

moins de la moitié de la variation dimensionnelle associée à une HR de $\pm 10\%$. Puisque le tableau est établi à partir de données probantes historiques montrant une rupture à une HR de $\pm 40\%$, l'hystérésis rend les extrapolations de la contrainte à des variations plus faibles progressivement inférieures à celles estimées dans le tableau 1.

- Le coefficient de dilatation hygroscopique varie en fonction de l'HR. Lorsqu'il est tracé en fonction de l'HR, il suit une courbe en forme de « S ». En dessous de 25% d'HR et au-dessus de 75% d'HR, le coefficient augmente progressivement. Il en ressort qu'une variation de $\pm 40\%$ de l'HR (ligne supérieure du tableau 1) a un effet plus que deux fois plus important qu'une variation de $\pm 20\%$ de l'HR. (Cette correction de la relation entre $\pm 40\%$ d'HR et $\pm 20\%$ d'HR s'ajoute à la correction de l'hystérésis qui s'applique à toutes les étapes entre $\pm 40\%$ d'HR et $\pm 5\%$ d'HR.) En résumé, l'extrapolation simplifiée dans les rangées présentant des variations plus faibles que $\pm 40\%$ d'HR donne des estimations conservatrices.

Les expressions représentant les dommages dans les cellules du tableau 1 pour une sensibilité élevée ou très élevée semblent à première vue indiquer que des dommages importants sur l'ensemble des collections se produiront à la suite de variations relativement faibles. Ces catégories, cependant, ne s'appliquent jamais à un objet entier ni même à la plus grande partie de l'objet dans le sens où l'objet en entier se désintégrerait. Le bon sens et l'expérience nous indiquent que le monde ne s'est pas désintégré avant l'apparition des systèmes de contrôle du climat modernes. La sensibilité élevée ou très élevée s'applique à des endroits précis à l'intérieur des objets et généralement à des objets mal conçus du point de vue de la durabilité. Par exemple, elle s'applique à la peinture qui traverse le joint affaibli d'une chaise en bois laqué ou d'une peinture sur panneau, au papier près des épingles qui maintiennent une grande feuille sur un cadre rigide et à la peau d'un oumiak à l'endroit où elle est attachée au cadre par des cordons trop peu nombreux et trop étroits. Étant donné que pour tout objet historique, ces endroits se sont certainement rompus il y a fort longtemps, il ne peut s'agir que de réparations et de remplissages qui comblent ces mêmes endroits.

Le chapitre du *manuel de l'ASHRAE* contient un tableau complet qui développe le contenu générique du tableau 1. ClimaSpec se sert de ce tableau et d'autres sources pour fournir un accès rapide aux évaluations de la sensibilité spécifique de chaque collection ou objet que vous souhaitez mieux comprendre.

La sensibilité initiale aux variations n'est pas une science précise

Les chiffres utilisés pour préciser les variations dans la présente ressource, tels $\pm 10\%$ et $\pm 20\%$ ou $\pm 5^\circ\text{C}$ et $\pm 10^\circ\text{C}$, ne doivent pas être interprétés comme signifiant que la science est précise à 1% d'HR ou à 1°C et que le risque change soudainement à ces valeurs précises. Il s'agit de chiffres ronds fondés sur les meilleures estimations du risque à notre disposition. Des chiffres tels que $\pm 8\%$ d'HR ou 6°C n'ont pas été utilisés, car ils pourraient sous-entendre une précision qui n'existe pas à l'heure actuelle.

(Malheureusement, la conversion de ces chiffres ronds, qui proviennent d'unités du Système international d'unités [système métrique], en unités coutumières américaines, comme l'exige l'édition en livre-pouce du *manuel de l'ASHRAE*, crée des chiffres qui ne sont pas ronds, mais ils doivent être laissés tels quels par souci de cohérence.) Même si, un jour, la science devient très précise, elle ne fournira qu'une probabilité précise qu'un objet soit endommagé à chaque variation et non la garantie qu'une rupture se produira précisément à la suite d'une telle variation.

Un contrat de prêt est une obligation précise

Le fait d'affiner les recommandations pour la préservation à long terme de vos propres collections ne lève pas les obligations contractuelles établies pour les prêts ou pour des programmes comme le [programme Désignation pour les établissements et les administrations publiques](#) ou le [Programme d'indemnisation pour les expositions itinérantes au Canada](#). Une spécification précise dans un contrat de conception ou un contrat de prêt est un énoncé précis des obligations, même si la spécification emprunte des chiffres ronds à une science imprécise. Malheureusement, il est difficile de mesurer les conditions réelles d'HR avec suffisamment de précision pour savoir si le contrat a été respecté. Mesurer l'HR avec une précision supérieure à $\pm 5\%$ nécessite des instruments coûteux. Comme indiqué ailleurs, il n'existe qu'un seul moyen de garantir la sécurité climatique des objets précieux : un contenant sûr dans lequel on trouve un microclimat.

L'historique de la collection et les variations démontrées

Les fissures dans un objet, c'est-à-dire la délamination et les fissures visibles, ne peuvent pas se reformer à un même endroit, à moins que l'ancienne rupture n'ait été refixée ou collée. Lorsqu'elle est exposée à la même variation qui a provoqué la fissure, celle-ci s'ouvre et se referme simplement (Michalski, 1993 et 2007). Des études portant sur des fissures dans des meubles en bois situés dans des bâtiments soumis à des variations importantes mais constantes, et pour lesquels existent des photographies historiques, ont montré que les fissures étaient effectivement toutes anciennes et n'avaient visiblement pas progressé (Ekelund et coll., 2018). Une analyse récente de la mécanique des couches de peinture indique que la craquelure atteint une saturation au-delà de laquelle de nouvelles fissures ne se formeront pas (Wu et coll., 2014; Bratasz et Vaziri Sereshk, 2018). Ces limites à l'accumulation des dommages malgré la réapparition du danger sont très différentes des autres processus de détérioration qui continuent de s'accumuler jusqu'à ce que le matériau se désintègre, comme des événements répétitifs de moisissure, la détérioration chimique continue, la décoloration à la lumière et les dommages attribuables à la pollution. Si la plus grande variation subie par un objet dans le passé a été une baisse

de 30 % de l'HR par rapport à une moyenne annuelle d'HR de 50 % (une baisse de 20 % de l'HR), tous les dommages mécaniques susceptibles d'être causés par une seule variation de cette ampleur se sont déjà produits. Par conséquent, une future baisse de l'HR légèrement inférieure à cette précédente baisse ne peut pas provoquer une nouvelle fissure.

La variation démontrée, établie par l'historique du climat, est extrêmement importante pour fixer des objectifs réalistes et durables qui entraînent un faible risque pour les collections. L'Outil de prise de décisions relatives au contrôle du climat exige de connaître l'historique du climat dans certaines situations afin d'établir la sensibilité de la collection. De même, ClimaSpec détermine différentes sensibilités et recommandations en fonction de l'historique du climat auquel l'objet ou la collection a été exposé.

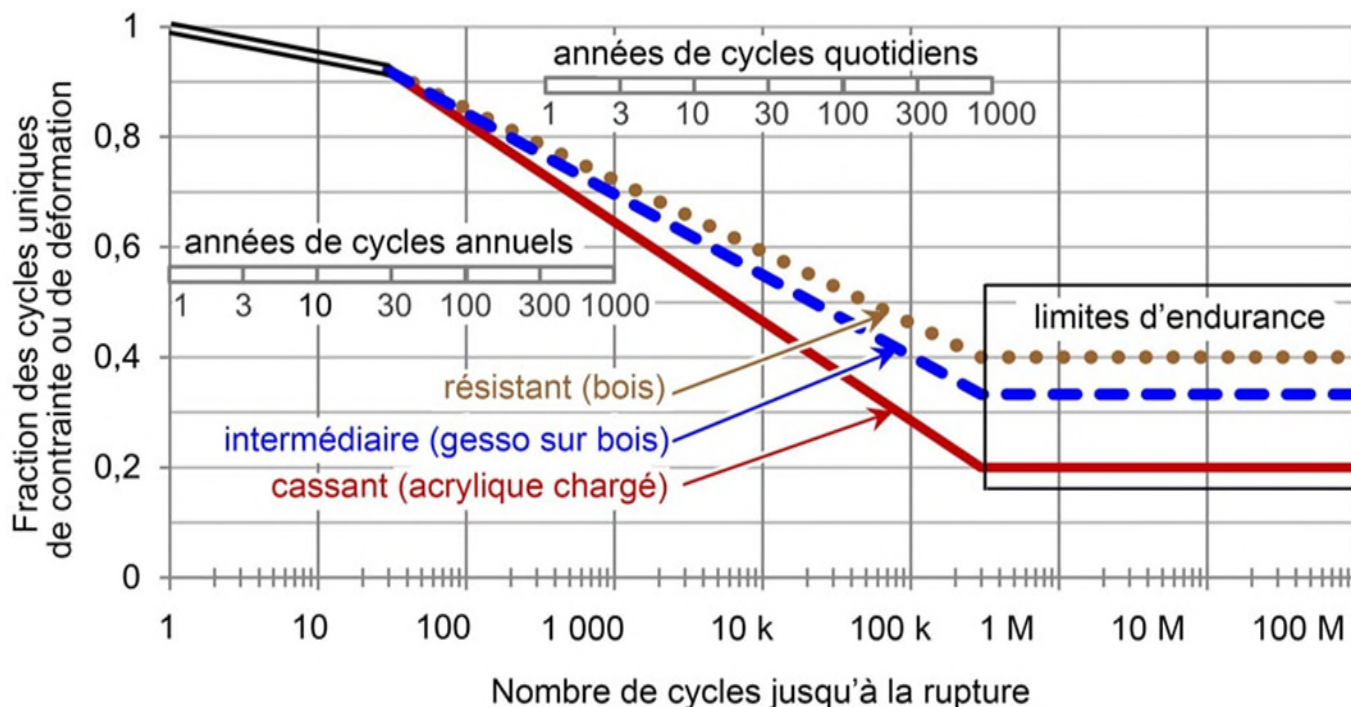
La rupture par fatigue

Plusieurs milliers de variations supplémentaires similaires à celle qui est considérée comme la variation démontrée de l'objet peuvent entraîner une nouvelle croissance des fissures selon un processus appelé « fatigue ». Il s'agit d'une correction subtile à l'application de la variation démontrée, et elle a été intégrée dans les conseils fournis par ClimaSpec.

La figure 1 et les tableaux 2 et 3 proviennent d'un examen (Michalski, 2014) des meilleures études de fatigue pour les matériaux essentiels aux collections patrimoniales : bois, peintures et gesso. Les tracés tels que ceux de la figure 1 sont appelés des courbes S-N (tracés représentant la contrainte en fonction du nombre de cycles) ou courbes de Wöhler. La courbe en forme de « S » habituellement tracée par les courbes S-N a été simplifiée de manière à représenter trois lignes droites :

- le plateau initial qui passe de 1 à environ 0,9 à 30 cycles;
- la région de transition de 30 à plus de 300 000 cycles;
- le plateau final, appelé « limite d'endurance », qui commence à environ 1 000 000 de cycles.

À la limite d'endurance, les dommages dus à la fatigue cessent. Bien qu'elle présente un intérêt pour les études sur les vibrations, l'exposition à 1 000 000 de cycles (c'est-à-dire 1 000 000 de variations) va bien au-delà de ce qui est pertinent en ce qui a trait aux variations quotidiennes (2 700 ans), et ce, sans parler des variations saisonnières.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0030

Figure 1. Graphique de fatigue pour les matériaux allant de « résistants » à « cassants » (Michalski, 2014).

Description de la figure 1

La figure 1 contient un seul graphique comportant trois tracés. L'axe horizontal est une échelle logarithmique du nombre de cycles nécessaires pour provoquer une rupture, et l'axe vertical est la contrainte ou la déformation qui provoque cette rupture, exprimée comme une portion de la contrainte ou de la déformation qui provoque la rupture en un cycle. Les trois tracés commencent tous à gauche à $x = 1$ et $y = 1$. Ils descendent vers la partie inférieure droite pour $x = 1$ million de cycles et des valeurs de y comprises entre 0,2 et 0,4.

Tableau 2 : Facteurs de fatigue pour les matériaux allant de « résistants » à « cassants » (tirés de la figure 1) pour la gamme pratique de cycles annuels

Type de matériaux	1 an	3 ans	10 ans	30 ans	100 ans	300 ans	1000 ans
Matériaux résistants, comme le bois	1	0,98	0,95	0,92	0,84	0,78	0,71
Matériaux intermédiaires, comme le gesso sur bois	1	0,98	0,95	0,92	0,83	0,75	0,70
Matériaux cassants, comme l'acrylique chargé	1	0,98	0,95	0,92	0,82	0,72	0,46

Tableau 3 : Facteurs de fatigue pour les matériaux allant de « résistants » à « cassants » (tirés de la figure 1) pour la gamme pratique de cycles quotidiens

Type de matériaux	1 an	3 ans	10 ans	30 ans	100 ans	300 ans	1000 ans
Matériaux résistants, comme le bois	0,78	0,71	0,65	0,59	0,51	0,45	0,40

Matériaux intermédiaires, comme le gesso sur bois	0,76	0,69	0,62	0,54	0,48	0,39	0,32
Matériaux cassants, comme l'acrylique chargé	0,72	0,63	0,45	0,35	0,29	0,28	0,20

Les lignes sur la figure 1, ou les rangées des tableaux 2 et 3, peuvent être considérées comme des combinaisons équivalentes de l'ampleur des variations et du nombre de variations. Par exemple, en suivant la dernière rangée du tableau 3 pour les matériaux cassants comme l'acrylique chargé, une seule variation annuelle d'une ampleur de $\pm X$ % d'HR est équivalente à 30 ans de variations annuelles d'une ampleur de $0,92 \times \pm X$ % d'HR ou à 100 ans de variations annuelles d'une ampleur de $0,82 \times X$ % d'HR, et ainsi de suite.

En réalité, il est peu probable que les variations quotidiennes ou hebdomadaires soient exactement de la même ampleur, de sorte que la fatigue, même due aux variations quotidiennes ou hebdomadaires, est déterminée simplement par la plus grande variation de l'année (les pics d'hiver et d'été). C'est l'échelle de la variation annuelle indiquée dans le coin inférieur gauche de la figure 1, et fournie dans le tableau 2, qui nous intéresse.

Pour obtenir une estimation du risque à venir, fondée sur un historique comportant de nombreuses variations plutôt que sur une seule variation historique, il faut utiliser le rapport entre les facteurs futurs et historiques. Par exemple, si l'on sait qu'au cours des 30 dernières années, il y a eu une variation annuelle constante de l'HR de $\pm X$ % et que l'on souhaite connaître une variation sûre pour les 100 prochaines années pour un matériau cassant, on doit trouver, dans le tableau 2, le facteur pour 30 variations (0,92) et le facteur pour 100 variations (0,82). Ensuite, on calcule le rapport de ces deux facteurs (le facteur pour 100 ans divisé par le facteur pour 30 ans), qui est de $0,82 \div 0,92 = 0,89$. Si l'on sait qu'au cours des 30 dernières années, l'HR a eu une moyenne annuelle proche de 50 %, mais a varié de ± 30 % (donc jusqu'à 20 % d'HR chaque hiver), le maintien des variations futures à 0,89 ou moins de ± 30 % d'HR (c'est-à-dire ± 27 % d'HR) assurera alors la sécurité pour les 100 prochaines années. En d'autres termes, il ne faut pas laisser l'HR chuter en hiver de plus de 27 % par rapport à la moyenne de 50 % d'HR (on ne doit pas descendre en dessous de 23 % d'HR).

On notera que la différence n'est pas énorme par rapport aux 20 % d'HR des 30 dernières années. De très légères réductions de la variation par rapport aux pires variations historiques présentent d'énormes avantages.

On peut lire ces fractions directement à partir de la figure 1 ou des tableaux 2 et 3, ou encore utiliser l'équation suivante pour la partie centrale du tracé pour les matériaux cassants, qui s'applique à une plage de 30 à 300 000 cycles.

$$\text{Équation 1 : } \pm X_f\% \text{ HR} = \pm X_h\% \text{ HR} * \{[0,18 * \log_{10}(n_h) + 1,19] / [0,18 * \log_{10}(n_f) + 1,19]\}$$

Où

$\pm X_f\% \text{ HR}$ = variation future maximale à ne pas dépasser

$\pm X_h\% \text{ HR}$ = ampleur des variations historiques connues

n_h = nombre de cycles historiques connus (30 et plus)

n_f = nombre de cycles futurs dont il faut tenir compte (maximum 300 000)

En résumé, la fatigue affine le concept de variation démontrée comme suit : pour chaque période de n années de tendance historique connue de variations, on peut prévoir que le fait de rester dans cette tendance démontrée pendant les n prochaines années entraînera un risque très faible de nouvelles ruptures. En outre, si l'on réduit très modestement les variations futures par rapport au modèle éprouvé, on peut projeter de nombreuses fois plus loin que n années.

Ne cachez pas que votre contrôle du climat a pu être mauvais dans le passé. Cet historique des variations démontrées est la meilleure estimation de la sensibilité de toute collection et le meilleur guide lors du choix d'options durables pour le contrôle du climat.

L'humidité peut réduire une variation démontrée

À une HR très élevée (bien supérieure à 75 %), le bois peut être écrasé si on l'empêche de se dilater (par exemple, des tenons maintenus serrés dans une mortaise). Lorsque l'HR redevient modérée, le bois reste écrasé. À une HR très élevée, la colle animale qui maintient ces joints et ces placages en place passe de solide et inflexible à faible et malléable, et à une gelée proche de 100 % d'HR. Par conséquent, les composants des joints et des placages des meubles qui ont été exposés à l'humidité se recollent dans des positions légèrement modifiées lorsqu'ils reviennent à une HR modérée. Dans des cas extrêmes, les placages se détachent et se déforment lorsqu'ils sont exposés à l'humidité et restent déformés lorsque l'HR revient à des valeurs modérées. Une variation démontrée qui a été établie dans une plage de 0 % à 75 % d'HR peut être réduite après une période d'humidité. L'ICC a

observé cet effet dans des joints de bois plaqués en utilisant l'émission acoustique (Hagan, 2021). On peut s'attendre à ce que d'autres objets à base de colle animale ou de grande taille, comme les peintures sur toile, soient soumis au même effet.

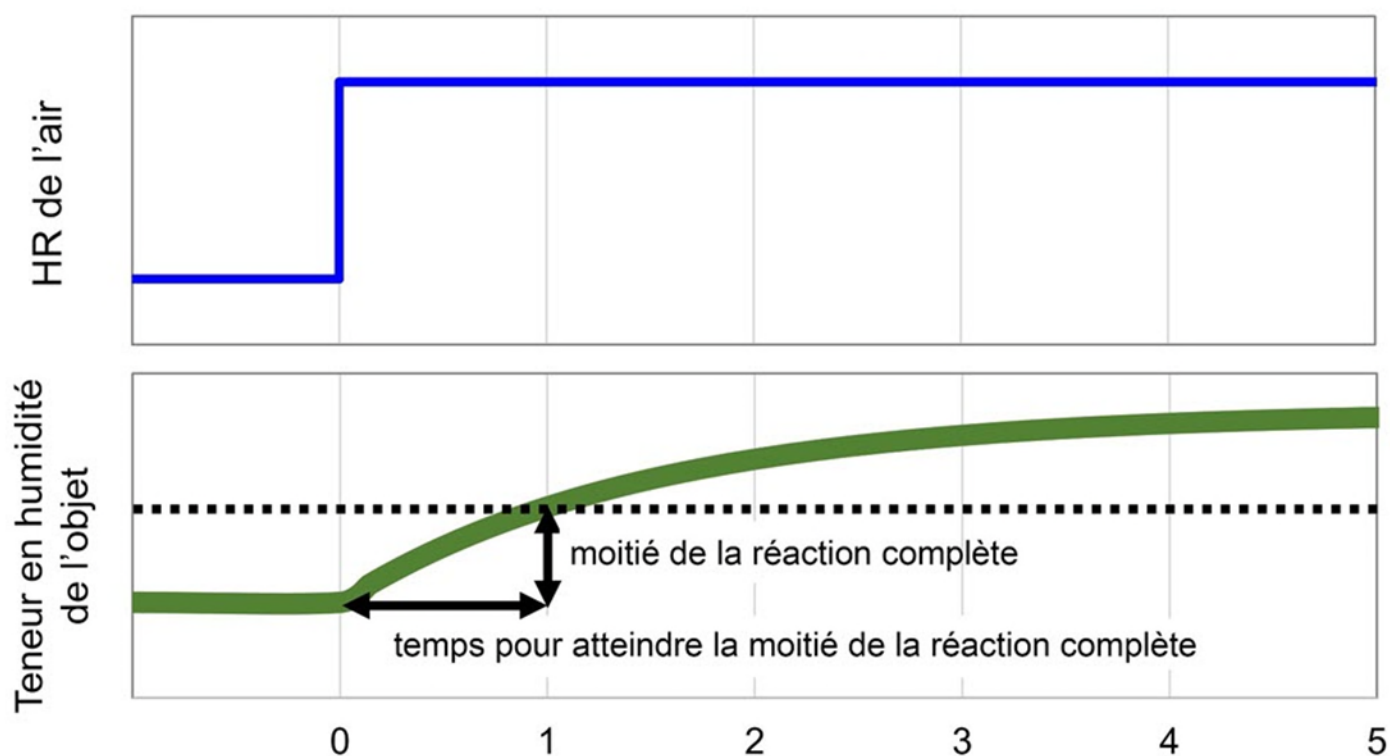
Concrètement, les périodes d'humidité ne causent pas seulement de graves dommages mécaniques en soi, mais elles peuvent réduire une variation démontrée qui a été établie pour des variations inférieures à 75 % d'HR. L'ampleur d'une telle réduction demeure incertaine.

Annexe C : Les temps de réaction des objets et les multiples avantages des contenants de protection

La présente annexe fournit le contexte technique des estimations de temps de réaction de ClimaSpec. Elle explique également pourquoi l'intégration de contenants dans lesquels on trouve un microclimat dans la conception des bâtiments et les systèmes mécaniques est essentielle pour une approche durable, fondée sur le risque, de l'utilisation et du soin des collections.

La signification du temps de réaction

Lorsqu'un objet en équilibre avec la température et l'HR ambiantes est exposé à un changement de température ou d'HR, il lui faut du temps pour réagir pleinement (c'est-à-dire pour être à nouveau en équilibre avec son environnement). La forme générale de cette réaction est une courbe, comme le montre le graphique inférieur de la figure 2.



Temps par intervalles de mi-temps (après le changement d'HR)

© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0032

Figure 2. Variation de la teneur en humidité d'un objet au fil du temps, en réaction à un changement soudain de l'HR de l'air ambiant.

Description de la figure 2 :

La figure 2 contient deux graphiques. L'axe horizontal correspond au temps, qui est représenté par des intervalles de mi-temps. Le graphique du haut représente l'HR et montre une seule augmentation brusque d'une HR initiale à une HR finale stable. Le graphique du bas représente la teneur en humidité de l'objet et montre une montée progressive jusqu'à un plateau final de réaction complète à la variation de l'HR. Une ligne horizontale en pointillés marque le milieu de cette courbe de teneur en humidité.

Le temps de réaction (également appelé « le mi-temps ») est défini comme le temps nécessaire pour atteindre la moitié de la réaction maximale éventuelle. Il y a plusieurs avantages à définir un mi-temps plutôt qu'une réaction complète. La moitié du temps est sans ambiguïté, alors que l'expression « réaction complète » dépend de la fraction de la réaction qui est considérée comme une réaction complète. S'agit-il de 90 %, de 99 % ou de 99,9 % du changement éventuel? Le mi-temps a

également l'avantage de fournir une estimation prudente du délai à l'intérieur duquel il faut agir pour réduire les risques dus à une variation.

La signification du terme « contenant de protection »

Aux fins du contrôle du climat, un contenant de protection est un sac, une boîte, un boîtier, une armoire, une caisse, etc., qui réduit le contact entre la surface de l'objet et l'humidité et les polluants dans la pièce. En pratique, cela signifie non seulement que le matériau du contenant est peu perméable à l'eau ou aux polluants, mais aussi que le contenant est relativement étanche à l'air, puisque dans la plupart des situations, le principal chemin pour l'humidité et les polluants sont les petites ouvertures dans un contenant. (Des détails sont donnés dans les sections suivantes.) Bien que l'on puisse également considérer un revêtement nouveau ou historique sur un objet comme étant une forme de contenant, pour les besoins des conseils de conservation préventive, l'ICC fait uniquement référence aux contenants de protection qui peuvent être facilement enlevés si nécessaire.

Intégration des contenants dans le bâtiment et ses systèmes

Du point de vue de la gestion des risques, les risques pour les collections liés à divers types de variations de l'HR peuvent être divisés en deux types très différents (Michalski, 2016) :

- Événements fréquents : Les variations courantes au fil des heures, des jours et des saisons qui, avec le du temps, déterminent les variations démontrées de la collection. Elles peuvent être causées par les cycles naturels du climat extérieur ou les variations courantes du système mécanique.
- Événements rares : Il s'agit de changements extrêmes de température ou d'HR qui se produisent à des décennies, voire des siècles d'intervalle. Très peu des événements rares enregistrés sont naturels, mais c'était le cas pendant l'hiver exceptionnellement froid de 1928 à Londres qui a provoqué une chute extrême de l'HR à la National Gallery. À la suite de cet événement, le personnel de la galerie a observé des dommages inhabituels et importants sur les peintures sur panneaux, et cette observation a entraîné la tenue d'une enquête officielle de recherche (Michalski, 2016). Plus souvent, cependant, ces événements rares se produisent à la suite de défaillances de systèmes mécaniques en fin de vie (généralement 30 ans), qui peuvent créer une HR très élevée ou très basse. (Les pannes dans les réserves au froid qui font que l'HR atteint 100 % ne deviennent des tragédies que lorsque les objets qui sont mis en réserve ne sont pas emballés.) Parfois, ces événements se produisent au début du cycle de vie d'un nouveau système mécanique, d'où la nécessité de procéder au débogage des nouveaux systèmes avant d'exposer des collections non emballées. Dans certains cas, ces événements sont le résultat du déménagement d'une collection dans des conditions d'HR améliorées, après

des décennies de mise en réserve dans un environnement stable à une moyenne annuelle d'HR très différente.

Du point de vue de la gestion des risques s'appuyant sur de nombreuses décennies de préservation, un événement rare, ou même seulement une probabilité de 10 % qu'un événement rare survienne, est le principal risque dû aux variations du climat. Le seul moyen de se prémunir contre de tels risques est l'utilisation de contenants de protection. Ces derniers font de plus en plus partie des stratégies de préservation de base, et pas seulement pour les établissements tels que les maisons historiques sans système de contrôle du climat (consulter [*Agent de détérioration : humidité relative inadéquate – Vignette 2. De simples vitrines d'exposition qui permettent de réduire les conditions d'HR inadéquate*](#)), mais aussi pour les grands musées qui possèdent des objets précieux et qui souhaitent réduire les risques à long terme (consulter les figures 10a et 10b dans [*Exigences de base de la conservation préventive*](#)).

On peut alors se demander à quoi servent les systèmes de contrôle du climat, en dehors de ceux nécessaires au confort humain, si tous les objets sont placés dans des contenants de protection. Outre le fait que les musées, de grande et petite taille, utilisent la capacité de réduction des risques des contenants pour des objets ciblés (objets d'une valeur exceptionnelle d'une sensibilité exceptionnelle ou exposés à un risque exceptionnel de vandalisme), la réalité est que de simples contenants ne sont pas en mesure d'atténuer les changements de température pendant plus de quelques heures, et la plupart ne peuvent pas atténuer les variations saisonnières de l'HR. En revanche, même les contenants simples peuvent atténuer les conséquences des rares pannes de système qui peuvent durer plusieurs jours, voire plusieurs semaines, avant que des réparations ne soient effectuées; ils peuvent également atténuer les conséquences associées aux rares événements météorologiques qui surpassent les capacités du système. Les contenants réduisent aussi considérablement la capacité des polluants externes d'atteindre les objets. (Consulter le Bulletin technique 32 [*Produits utilisés en conservation préventive*](#) pour connaître les matériaux qui ne sont pas eux-mêmes une source de polluants.) Alors que vous pouvez avoir des raisons d'éviter l'utilisation de contenants de protection dans le cadre d'une exposition, le fait de simplement emballer les objets en réserve est le seul moyen rationnel d'assurer une gestion des risques à long terme (consulter le Bulletin technique 32).

En résumé, la préservation à long terme durable dépend de l'intégration des forces des systèmes mécaniques (qui font en sorte que la température et l'HR moyennes ne sont pas les mêmes qu'à l'extérieur) et des contenants de protection (qui atténuent les variations de l'HR et bloquent l'exposition aux polluants) avec les forces et les limites du bâtiment. Ainsi, on reconnaît que le climat local n'est pas seulement une condition de conception, mais probablement un facteur déterminant des variations démontrées des collections locales.

Temps de réaction à l'humidité relative des objets avec et sans contenants

Une partie du contenu des deux sections suivantes est parue pour la première fois dans le chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries » de l'édition de 1999 ou de celles de 2019 et de 2023 du *manuel de l'ASHRAE* préparé par l'auteur alors qu'il était membre du personnel de l'ICC, mais aussi du comité responsable de ce chapitre. Le contenu de ce chapitre a été abrégé et actualisé dans la présente section.

Le tableau 4 présente les temps de réaction à l'HR pour les objets à l'air libre et les objets placés dans des contenants de protection. Lorsqu'elles étaient accessibles, les mesures directes ont été citées. Les autres estimations sont fondées sur des calculs, qui sont expliqués sous [Équations qui sous-tendent les calculs du temps de réaction](#).

La plage des temps de réaction peut sembler extraordinairement étendue, mais elle découle de deux phénomènes :

- Le temps de réaction varie en fonction du carré de l'épaisseur d'un matériau. Un morceau de bois 50 fois plus épais qu'un autre mettra 2 500 fois plus de temps à réagir que ce dernier. (Par exemple, une planche de 5 cm d'épaisseur dans une pirogue mettra 50 × 50 fois plus de temps à réagir qu'un morceau de bois de 1 mm d'épaisseur dans un corps de guitare ou un violon.)
- L'effet de confinement. Par rapport à l'air libre, un contenant de protection raisonnablement étanche peut réduire le taux d'accès de l'humidité et des polluants par un facteur de 10 à 100 ou plus. Les objets qui réagissent à l'HR en quelques heures à l'air libre, comme les aquarelles, ou qui ternissent en quelques semaines, comme l'argent non traité, mettront des mois, voire des années, à réagir ou à ternir dans un contenant bien scellé fait de matériaux imperméables. En voici deux exemples : un cadre scellé avec du verre muni d'un dos protecteur pour les aquarelles et une vitrine étanche pour l'argent.

Tableau 4 : Temps de réaction à l'HR (environ 20 °C)

Plage de temps	Objets	Objets placés dans des contenants	Répercussions sur la conception
Plus de 10⁸ secondes (un an ou plus)	Objets en bois d'au moins 12 mm d'épaisseur, s'ils sont enveloppés dans du polyéthylène épais	Peintures sur toile, papier ou photographies avec plusieurs couches de carton (ou tampon) encadrés avec une	Le risque n'apparaît que si l'HR moyenne annuelle dans l'espace est

	de 200 µm avec des coutures parfaites : au moins 350 jours	façade en verre et un dos protecteur imperméable, joints parfaits à l'exception d'un seul trou d'épingle d'égalisation de pression : environ 15 ans • Contenant de protection fait d'une feuille acrylique de 4 mm : environ 11 mois (Michalski, 2005)	inacceptable pour l'objet placé dans un contenant
Environ 10⁷ secondes (semaines ou mois)	• Grands objets en bois non vernis, 100 mm en travers du fil, 700 mm en suivant le fil du bois : 100 jours • Livres, exposés uniquement sur le bord antérieur, fortement compressés : environ 25 jours • Livres faiblement compressés : environ 11 jours (Derluyn et coll., 2007) • Livre à couverture rigide non spécifié, exposé sur toutes ses faces : environ 18 jours (Bigourdan, 2012)	• Bobines de film de 35 mm dans une boîte métallique : 60 jours (Adelstein et coll., 1997) • Peintures sur toile, papier ou photographies avec plusieurs couches de carton (ou tampon) encadrés avec une façade en verre et un dos protecteur imperméable mais avec des espaces de 0,1 mm en haut et en bas : 30 jours (Michalski, 2005)	• Les variations horaires et quotidiennes de l'HR créent un risque négligeable • Les ajustements saisonniers de l'espace sont atténués • Une perte de système de moins d'une semaine crée peu de risques

Environ 10⁶ secondes (jours ou une semaine)	• Couches épaisses de peinture à l'huile ou de peinture alkyde : de plusieurs jours à plusieurs semaines pour les couches fines à épaisses • Peintures sur panneau ancienne dont le dos est imperméabilisé : environ 15 jours (Stillwell et Knight, 1934) • Bobines de film de 35 mm sans boîte métallique : 4 jours (Adelstein et coll., 1997) • Dosse de bois non vernie, bois de densité moyenne : 20 mm en travers du fil, 5 jours; 130 mm en suivant le fil du bois, 5 jours • Bahut en bois, vide avec un vernis léger et des interstices inférieurs à 1 mm, environ 7 jours • Ivoire, sans revêtement et cylindrique, d'environ 25 mm de diamètre (Lafontaine et Wood, 1982)	• Peintures sur toile, papier ou photographies avec plusieurs couches de carton (ou tampon) encadrés avec une façade en verre et un dos protecteur imperméable, mais avec des espaces de 0,5 mm en haut et en bas (Michalski, 2005) • Hackney (1990) a mesuré au maximum 6 jours avec un cadre en verre et un dos protecteur (un temps de réaction aussi court doit être dû à des fuites par les interstices) • Boîte d'archives, en carton ou en polypropylène, sans trous, pleine : environ 2 jours (Batterham et Wignell, 2008, estimation à partir de leur humidification mesurée liée à la variation quotidienne externe de ×4)	• Les variations horaires et quotidiennes de l'HR présentent peu de risques • Une perte du système pendant plusieurs jours peut créer un risque élevé
--	--	--	--

Environ 10⁵ secondes (un jour)	• Dosse de bois non vernie, 8 mm en travers du fil, 50 mm en suivant le fil • Ivoire, sans revêtement et cubique, d'environ 25 mm (Lafontaine et Wood, 1982)	• Peintures sur toile avec une couche de peinture continue et un dos protecteur imperméable appliqué sur le cadre (Di Pietro et Ligterink, 1999)¹	• Les variations horaires de l'HR créent peu de risques • Une perte de système qui dure toute la journée peut créer un risque élevé
Environ 10⁴ secondes (heures)	• Peinture acrylique pure, couche d'épaisseur moyenne • Peinture à l'huile pure, peinture alkyde, couches fines • Bois non verni, panneaux de fibres de bois, cuir, peau, 3 mm d'épaisseur	• Les temps de réaction des contenants comportant des objets hygroscopiques ne seront pas aussi rapides, à moins que les interstices ne soient larges de plusieurs millimètres. Les objets réagissent alors comme s'il n'y avait pas de contenant	• Les variations horaires de l'HR ou la perte du système peuvent créer des risques
Moins de 10³ secondes (quelques minutes ou moins)	• Feuille de papier simple : 4 minutes (Kupczak et coll., 2018) [y compris les pages de livres ouvertes en éventail] • Feuille fine de parchemin ou d'ivoire • Fines couches de peinture aquarelle ou de gouache • Plumes, fourrure et poils	• Les temps de réaction des contenants comportant des objets hygroscopiques ne seront pas aussi rapides, à moins que les interstices ne soient larges de plusieurs millimètres. Les objets réagissent alors comme s'il n'y avait pas de contenant	• La variation de l'HR ou une perte du système de quelques minutes seulement peut créer un risque²

	• Textiles légers et costumes • Couche de gélatine d'un tirage photographique ou d'un film • Toile encollée utilisée pour les peintures		
--	---	--	--

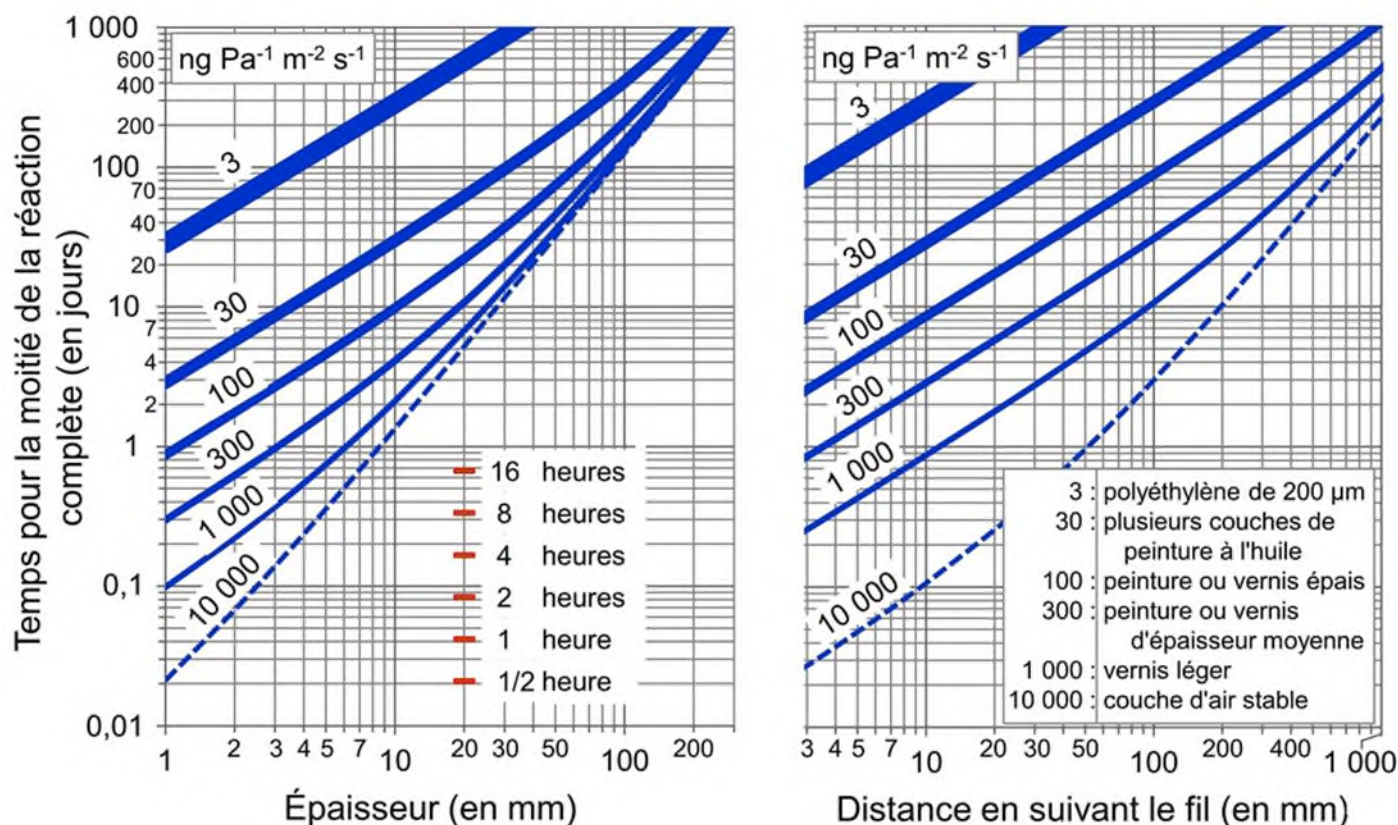
¹ Ces objets ne sont que partiellement confinés.

² Certains de ces objets sont traditionnellement placés dans des contenants de protection, comme les œuvres sur papier. D'autres, comme les textiles et les costumes, ne sont généralement pas placés dans des contenants.

Notes techniques pour le tableau 4 : Les calculs pour les objets ayant la forme d'une plaque plane supposent une exposition à l'air des deux côtés, sauf indication contraire (consulter [Équations qui sous-tendent les calculs du temps de réaction](#)). Adelstein et coll. (1997) et Bigourdan (2012) ont rapporté des temps de réaction de 90 %. Ceux-ci sont convertis pour le tableau 4 en mi-temps par un facteur de 0,4, en supposant une courbe de détérioration approximativement exponentielle comme à la figure 2, où 90 % de la réaction se produit à 2,4 mi-temps, alors le mi-temps est de $1 \div 2,4 = 0,42$ du temps pour 90 % de la réaction. Derluyn et coll. (2007) ont mesuré un livre expérimental carré de 50 mm de côté, fermé de tous les côtés sauf du côté de la gouttière. Leurs temps ont été ajustés à une profondeur plus réaliste de 100 mm, donc augmentés de 4 fois (les temps varient en fonction du carré de l'épaisseur). Les estimations de Michalski (2005) sont fondées sur les données relatives aux matériaux et les équations de fuite du contenant de protection. Les estimations pour les objets en bois et les meubles sont fondées sur les figures 3 et 4.

Graphiques représentant le temps de réaction des objets en bois

Les objets en bois constituent une part importante de nombreuses collections patrimoniales. Comme leur épaisseur varie d'environ un millimètre à près d'un mètre, et compte tenu de la loi du carré mentionnée précédemment, le temps de réaction des objets en bois peut varier de quelques minutes à plusieurs années. La grande variété de revêtements appliqués sur le bois complique davantage les prédictions. Certains objets courants ont été énumérés dans le tableau 4; toutefois, les figures 3 et 4 fournissent une représentation plus complète du phénomène et montrent les énormes avantages que procure l'emballage des objets en bois dans une pellicule de polyéthylène étanche à l'air lorsqu'ils ne sont pas en exposition.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0033

Figure 3. Temps de réaction en jours (près de 20 °C) du bois de densité moyenne aux changements d'HR. Le graphique de gauche montre le temps de réaction pour le bois en travers du fil, et celui de droite montre le temps de réaction pour le bois en suivant le fil. Ces graphiques supposent que les deux côtés (ou les deux extrémités) de l'objet sont exposés.

Description de la figure 3 :

La figure 3 présente deux graphiques côte à côte. Tous deux partagent un axe vertical intitulé « Temps pour la moitié de la réaction complète (en jours) ». L'axe horizontal du graphique de gauche fournit l'épaisseur en millimètres. Sur le graphique de droite, l'axe fournit la distance en suivant le fil en millimètres. Chaque graphique comporte six tracés. Tous les tracés présentent une pente douce, partant du bas à gauche et allant vers le haut à droite, et semblent converger en haut à droite. Les points clés des six tracés du graphique de gauche et de celui de droite sont présentés dans le tableau 5 et le tableau 6, respectivement.

Tableau 5 : Temps de réaction en jours (près de 20 °C) d'une planche de bois de densité moyenne en fonction de son épaisseur, comme le montre la figure 3 (à gauche)*

Perméance ng/Pa/m ² /s	Exemple de revêtement ayant cette perméance	1 mm d'épaisseur	2 mm d'épaisseur	5 mm d'épaisseur	10 mm d'épaisseur	20 mm d'épaisseur	50 mm d'épaisseur
3	Polyéthylène de 200 µm	30	60	140	300	600	1 500
30	Plusieurs couches de peinture à l'huile	3	6	15	30	60	170
100	Peinture ou vernis épais	0,9	2	5	10	22	80
300	Peinture ou vernis d'épaisseur moyenne	0,3	0,6	2	4	10	50
1 000	Vernis léger	0,1	0,2	1	2	7	36
10 000	Couche d'air stable	0,02	0,07	0,4	1	5	32

* Certaines valeurs sont en dehors de la plage du graphique.

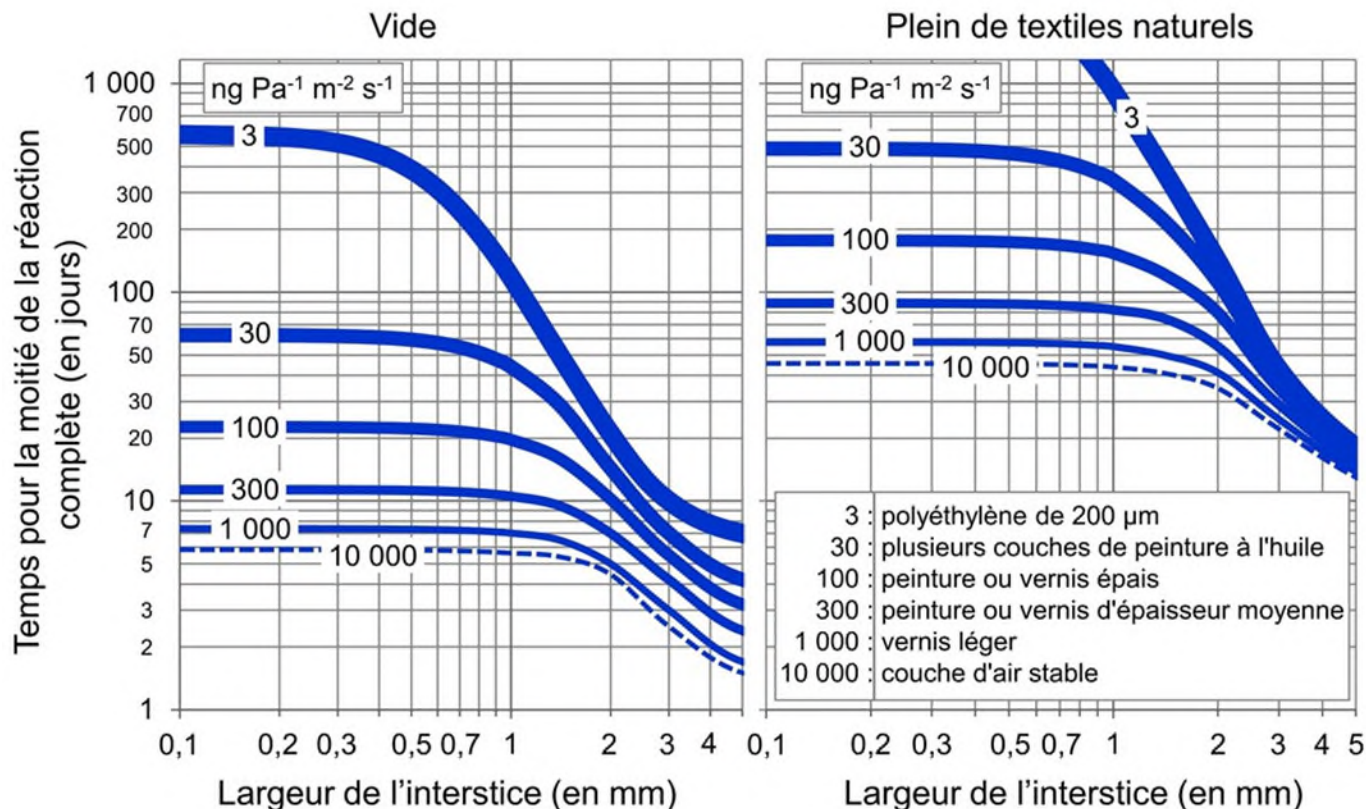
Note technique pour les tableaux 5 à 8 : La perméance est une mesure du taux de transfert d'humidité à travers une couche de matériau en fonction de la pression de vapeur d'eau agissant sur cette couche.

Tableau 6 : Temps de réaction en jours (près de 20 °C) d'un bois de densité moyenne lorsque la face exposée suit le fil du bois, comme le montre la figure 3 (à droite)*

Perméance ng/Pa/m ² /s	Exemple de revêtement ayant cette perméance	5 mm d'épaisseur	10 mm d'épaisseur	20 mm d'épaisseur	50 mm d'épaisseur	100 mm d'épaisseur	200 mm d'épaisseur
3	Polyéthylène de 200 µm	140	300	600	1 500	3 000	6 000
30	Plusieurs couches de peinture à l'huile	14	30	60	140	300	600
100	Peinture ou vernis épais	4	9	20	40	90	200
300	Peinture ou vernis d'épaisseur moyenne	1,4	3	6	15	30	70
1 000	Vernis léger	0,4	1	2	5	11	25
10 000	Couche d'air stable	0,05	0,1	0,3	1	3	10

* Certaines valeurs sont en dehors de la plage du graphique.

Le graphique de gauche sur la figure 3 et les valeurs sélectionnées dans le tableau 5 concernent une planche de bois dont les deux faces sont exposées. Le graphique de droite sur la figure 3 et les valeurs sélectionnées dans le tableau 6 concernent un objet en bois dont seule une face suivant le fil du bois est exposée. Pour les objets dont les deux sens du fil sont exposés, il faut d'abord trouver les deux ensembles de prédictions, puis sélectionner le temps le plus court, qui surestimera encore quelque peu le temps de réaction.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0035

Figure 4. Évolution du temps de réaction en jours (près de 20 °C) d'une armoire ou d'une commode en bois en fonction de l'augmentation de la largeur des interstices en haut et en bas. (L'objet a une hauteur de 1,5 m, une largeur de 1 m et une profondeur de 0,5 m; l'épaisseur du bois est de 1 cm; les interstices ont une profondeur de 15 mm et s'étendent d'un côté à l'autre de l'objet.)

Description de la figure 4 :

La figure 4 présente deux graphiques côte à côte. Les deux partagent un axe vertical intitulé « Temps pour la moitié de la réaction complète (en jours) ». L'axe horizontal des deux graphiques fournit la largeur de l'interstice en millimètres. Il y a six tracés dans chaque graphique, tous en forme de « S » similaire. Les points clés des six tracés du graphique de gauche et de celui de droite sont présentés dans les tableaux 7 et 8, respectivement.

Tableau 7 : Évolution des temps de réaction en jours (près de 20 °C) d'une armoire ou d'une commode en bois vide en fonction de la largeur des interstices en haut et en bas, comme illustré à la figure 4

Perméance ng/Pa/m ² /s	Exemple de revêtement ayant cette perméance	Espace de 0,1 mm	Espace de 0,5 mm	Espace de 0,7 mm	Espace de 1 mm	Espace de 2 mm	Espace de 3 mm	Espace de 5 mm
3	Polyéthylène de 200 µm	600	400	250	120	20	10	7
30	Plusieurs couches de peinture à l'huile	60	60	50	40	14	7	4
100	Peinture ou vernis épais	20	20	20	20	10	6	3
300	Peinture ou vernis d'épaisseur moyenne	11	11	11	10	7	4	2
1 000	Vernis léger	7	7	7	7	5	3	2
10 000	Couche d'air stable	6	6	6	6	4	3	2

Tableau 8 : Évolution des temps de réaction en jours (près de 20 °C) d'une armoire ou d'une commode en bois remplie de textiles en fonction de la largeur des interstices en haut et en bas, comme illustré à la figure 4

Perméance ng/Pa/m ² /s	Exemple de revêtement ayant cette perméance	Espace de 0,1 mm	Espace de 0,5 mm	Espace de 0,7 mm	Espace de 1 mm	Espace de 2 mm	Espace de 3 mm	Espace de 5 mm
3	Polyéthylène de 200 µm	4 000	3 000	2 000	1 000	140	40	9
30	Plusieurs couches de peinture à l'huile	500	500	400	350	100	40	9
100	Peinture ou vernis épais	200	200	170	150	80	35	9
300	Peinture ou vernis d'épaisseur moyenne	90	90	90	80	55	30	8
1 000	Vernis léger	60	60	60	50	40	25	8
10 000	Couche d'air stable	45	45	45	45	35	20	8

La figure 4 et les tableaux 7 et 8 concernent des meubles en bois qui sont vernis à l'extérieur, mais pas à l'intérieur. Ces meubles peuvent comprendre des tiroirs ou des portes avec des interstices en haut et en bas, ce qui permet à l'air extérieur de pénétrer et d'entrer en contact avec l'intérieur du meuble en bois non verni. Bien que ces meubles soient généralement vides lorsqu'ils sont dans un musée et souvent ouverts pour présenter l'intérieur de leurs compartiments, historiquement, ils

étaient fermés et remplis de vêtements ou de literie, ce qui constituait un excellent tampon d'humidité.

Sur la figure 4, les plateaux horizontaux à gauche sont des régions où les fuites d'air par les interstices sont insignifiantes et où l'effet du vernis du bois est dominant pendant le mi-temps. Les tracés chutent radicalement sur la droite lorsque la fuite d'air par les fissures domine. À l'extrême droite, les tracés commencent à s'incurver vers le haut, car les fuites d'air à l'intérieur du meuble sont si importantes que les pièces de bois, qui ne sont pas vernies à l'intérieur, se comportent simplement comme des dosses de bois entièrement exposées n'étant vernies que d'un côté. (Cette étape finale du comportement, qui n'affecte que le graphique de gauche, n'a pas été prise en compte dans les versions de la figure qui apparaissent dans les éditions de 1999, de 2019 et de 2023 du *manuel de l'ASHRAE*.)

Les leçons tirées de la figure 4 et des tableaux 7 et 8 sont que ce type de meuble, qui était habituellement fermé, bien ajusté et rempli de textiles, aurait pu survivre à de grandes variations de l'HR pendant de nombreuses semaines, voire des mois. Cependant, lorsque le meuble est vide dans un musée, il est beaucoup plus sensible aux variations brèves. S'il est laissé ouvert en permanence, un meuble revient aux temps de réaction des pièces de bois exposées, indiqués sur la figure 3 et dans les tableaux 5 et 6. Enfin, pour les pièces de bois individuelles, une pellicule de polyéthylène de forte épaisseur bien scellée offre une stabilité qui dure bien au-delà d'un an si l'on évite de laisser du vide dans l'emballage.

Préoccupations concernant les variations de température touchant les contenants dans lesquels on trouve un microclimat

Une préoccupation inévitable avec les contenants de protection est la variation de leur teneur en humidité qu'entraîne un changement de température. Cette préoccupation est apparue pour la première fois dans les années 1960 et concernait des œuvres d'art placées dans des caisses d'expédition, mais Toishi (1959) a démontré que, si une caisse scellée contenait un matériau hygroscopique, son HR se stabiliserait malgré une chute de la température ambiante de la pièce sous le point de congélation avant un retour à la normale. Stolow (1966) a fourni des données et des équations exhaustives qui lui ont permis d'obtenir un résultat contre-intuitif selon lequel, avec des matériaux hygroscopiques naturels, l'humidité dans un contenant diminue légèrement lorsque la température baisse (le contraire des contenants vides) en raison du léger déplacement vers le bas des isothermes d'humidité à des températures plus basses.

Thomson (1964) a démontré que le point de transition entre les contenants à HR contrôlée (HR stable ou qui diminue légèrement) et les contenants vides essentiellement non contrôlés pour les matériaux hygroscopiques, comme le bois, se produisait lorsqu'il y avait environ 1 kg de matériau par mètre cube de contenant. L'humidité était pleinement contrôlée lorsqu'on trouvait 10 kg de matériau par

mètre cube de contenant (environ 2 % du volume). Des auteurs ont ultérieurement examiné d'autres effets secondaires, comme la réponse dimensionnelle mixte thermique ou hygrique dans le bois (Richard, 2007) et la condensation dans les trous d'air lors de la récupération d'objets dans une réserve au froid (Padfield, 2002; Shashoua, 2005, 2008), mais le consensus est que ces effets secondaires occasionnels ne l'emportent pas sur les avantages que procure cette façon de faire (Richard, 2007; Shashoua, 2014).

L'effet de la température sur les temps de réaction

Les températures basses augmentent considérablement les temps de réaction et, inversement, les températures élevées les raccourcissent. Ce phénomène a été démontré lors de mesures effectuées sur des matériaux d'archives (Adelstein et coll., 1997). On peut estimer que les temps de réaction, tels ceux des tableaux 5 à 8 et de la figure 3, qui sont pour 20 °C, vont doubler à chaque baisse de 10 °C (par exemple, ×2 pour une mise en réserve à 10 °C, ×4 pour une mise en réserve à 0 °C, ×8 ou plus pour une mise en réserve à -10 °C). La cause en est la baisse du coefficient de diffusion de l'humidité dans les solides lorsque la température baisse. Les estimations pour une commode (figure 4 et tableaux 7 et 8) voient également les temps de réaction doubler à chaque diminution de 10 °C, mais pour des raisons légèrement différentes. Lorsque les interstices sont trop petits pour affecter les mi-temps (plateaux de gauche dans le graphique), les raisons sont les mêmes que celles susmentionnées. Lorsque les fuites au niveau des interstices dominent les mi-temps, la raison est que la capacité d'humidité de l'air infiltré diminue de moitié pour chaque baisse de 10 °C.

Équations qui sous-tendent les calculs du temps de réaction

Le temps de réaction d'une assiette (une forme qui s'applique à de nombreux objets culturels et qui fournit une limite supérieure aux cylindres, aux cubes, aux sphères, etc.) est donné par Crank (1979) comme suit :

$$\text{Équation 2 : } t_{1/2} = 0,049 * d^2 / D$$

Où

$t_{1/2}$ = mi-temps du contenant dans lequel on trouve un microclimat (en secondes)

d = épaisseur de l'assiette (ou de la feuille) [en mètres]

D = coefficient de diffusion (en m²/s)

Différents manuels fournissent les valeurs du coefficient de diffusion, dont Siau (2012) pour le bois ainsi que Park et Crank (1968) pour les polymères.

Le mi-temps d'humidité d'un contenant non étanche avec un matériau hygroscopique (objets ou tampons supplémentaires) peut être exprimé en fonction de la fraction du volume du contenant rempli par le matériau tampon (Michalski, 1994, équation 39) :

$$\text{Équation 3 : } t_{1/2} = 0,69 * (V_h * \alpha * \rho) / (N * V_c * C_{es})$$

Où

$t_{1/2}$ = mi-temps du contenant dans lequel on trouve un microclimat (en secondes, en heures ou en jours, selon les unités de fuite)

V_h = volume du matériau hygroscopique (en m³)

V_c = volume du contenant (en m³)

α = capacité hygrique (pente de l'isotherme d'humidité) [en kg/kg]

ρ = masse volumique en vrac du matériel hygroscopique (en kg/m³)

N = fuite (exprimée en renouvellements d'air par seconde, heure ou jour)

C_{es} = concentration d'eau dans l'air à saturation (en kg/m³)

Le rôle critique de la fuite (N) pour les objets se trouvant dans des contenants de protection peut être vu en suivant l'exemple du tableau 4 des peintures ou des œuvres d'art sur papier dans un cadre en verre scellé (de plus en plus utilisé par les grands musées, en particulier pour les peintures prêtées). En fonction d'infimes différences dans la largeur des fissures, le rendement peut changer de plusieurs ordres de grandeur. Cela est dû au rôle clé de l'infiltration dans la détermination de N et au fait que l'infiltration à travers des fissures étroites varie selon le cube de la largeur de la fissure; c'est-à-dire que la réduction de la largeur de la fissure par un facteur de 2 réduira l'infiltration d'air par un facteur de 8 (Michalski, 1994).

L'équation 1 peut être réduite à une estimation pour des matériaux tels que le papier, le bois, le cuir et les tissus denses proches de la température ambiante, 20 °C, où $C_{es} = 0,0173 \text{ kg/m}^3$. En utilisant une densité conservatrice, où ρ équivaut à environ 600 kg/m^3 , et une capacité hygrique conservatrice, où α est d'environ 0,05, on obtient alors l'équation suivante :

$$\text{Équation 4 : } t_{1/2} = 1\,200 * V_h / (N * V_c)$$

Un taux de fuite d'un renouvellement d'air par jour est considéré comme un objectif de conception approprié pour les vitrines étanches des musées (Thickett et coll., 2007); donc, un contenant de protection à moitié plein de bois ou de papier ($V_h/V_c = 1/2$) donnerait un mi-temps de 600 jours. En réalité, les contenants très étanches sont rarement remplis au maximum de leur capacité (bien que l'emballage de grands objets en bois dans du polyéthylène de forte épaisseur et parfaitement étanche permette d'y parvenir). Les contenants à moitié pleins sont généralement des armoires ou des caisses, et leurs fuites sont plus proches d'un renouvellement d'air par heure, ce qui assure tout de même un mi-temps de 25 jours. Une vitrine d'exposition dont le taux d'étanchéité s'élève à un renouvellement d'air par jour aura rarement plus de 10 % de son volume rempli de matériau hygroscopique, ce qui donne des mi-temps allant jusqu'à 120 jours. Dans la pratique, il est difficile mais pas impossible de réaliser et de maintenir une infiltration très faible (Thickett et coll., 2007).

Certaines estimations du tableau 4 sont fondées sur cette équation et sur les coefficients de diffusion que l'on trouve dans la documentation sur les polymères. Un objet avec une barrière d'humidité environnante (revêtement ou contenant) peut être simplifié comme une série de deux résistances au flux d'humidité. La figure 3 a été générée à l'aide de cette approche avec les données sur le bois de Siau (2012) pour un bois de densité moyenne à une HR de 50 %. Lorsque les barrières offrent une résistance utile (consulter les lignes supérieures de chaque tracé de la figure 3), les tracés ont une pente de 1 (linéaire). Lorsque les revêtements offrent une résistance négligeable, comme la couche limite de l'air dans une pièce calme, la pente des tracés passe à la loi carrée de l'équation 1. Il n'y a qu'une légère courbe lorsque l'épaisseur tombe à 1 mm en travers du fil. Kupczak (2018) a mesuré la contribution de la couche limite de l'air, qui est mesurable, mais loin d'être déterminante pour le taux, et ce, même pour une seule feuille de papier. Concrètement, les objets plus fins (par exemple, un violon, une figurine en ivoire et une feuille de papier) réagissent plus rapidement, mais ils bénéficient également beaucoup plus que les objets plus épais de revêtements ou de contenants de protection, même simples (comme les étuis, les armoires et les emballages).

La figure 4 a été générée à l'aide du même modèle de résistance en série, mais cette fois avec les équations de fuite pour un contenant qui se trouvent dans Michalski (1994). Outre l'hypothèse des dimensions mentionnées dans la légende de la figure 4, le graphique suppose également que la pression de cheminée typique à l'origine de l'infiltration d'air est due soit à une différence de température de 1 °C, soit à une différence d'HR de 40 %. Consulter Michalski (1994) pour obtenir une explication plus détaillée de ces chiffres.

Bibliographie

Adelstein, P. Z., J.-L. Bigourdan et J. M. Reilly. « Moisture Relationships of Photographic Film », *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 36, n° 3 (1997), p. 193-206.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. « Museums, Libraries and Archives », dans *ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications* (sous la direction de R. Parsons), Atlanta (Géorgie), ASHRAE, 1999, p. 20.1-20.13.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. « Museums, Galleries, Archives, and Libraries », dans *ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications* (sous la direction de M. S. Owen), Atlanta (Géorgie), ASHRAE, 2019, p. 24.1-24.46.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. « Museums, Galleries, Archives, and Libraries », dans *ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications* (sous la direction de M. S. Owen), Atlanta (Géorgie), ASHRAE, 2023, p. 24.-24.47.

Batterham, I., et J. Wignell. « The Mitigating Effects of Packaging on Temperature and Humidity Fluctuations », dans *5th AICCM Book, Paper and Photographic Materials Symposium* (sous la direction de P. McKay et A. Treasure), 2008, p. 11-16.

Bigourdan, J. « Understanding Temperature and Moisture Equilibration: A Path Towards Sustainable Strategies for Museum, Library and Archives Collections », présentation lors de la 10th Annual Indoor Air Quality Conference, Londres (Royaume-Uni), du 17 au 20 juin 2012.

Bratasz, Ł., et M. R. Vaziri Sereshk. « Crack Saturation as a Mechanism of Acclimatization of Panel Paintings to Unstable Environments », *Studies in Conservation*, vol. 63, suppl. 1 (2018), p. 22-27.

Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*, Oxford (Royaume-Uni), Oxford University Press, 1979.

Derluyn, H., H. Janssen, J. Diepens, D. Derome et J. Carmeliet. « Hygroscopic Behavior of Paper and Books », *Journal of Building Physics*, vol. 31, n° 1 (juillet 2007), p. 9-34.

Di Pietro, G., et F. J. Ligterink. « Prediction of the Relative Humidity Response of Backboard-Protected Canvas Paintings », *Studies in Conservation*, vol. 44, n° 4 (janvier 1999), p. 269-277.

Ekelund, S., P. Van Duin, A. Jorissen, B. Ankersmit et R. M. Groves. « A Method for Studying Climate-related Changes in the Condition of Decorated Wooden Panels », *Studies in Conservation*, vol. 63, n° 2 (2018), p. 62-71.

Hackney, S. « Framing for Conservation at the Tate Gallery », *The Conservator*, vol. 14, n° 1 (1990), p. 44-52.

Hagan, E. « Acoustic Emission Analysis of Humidity-induced Damage to Model Wood Structures », exposé présenté lors de l'atelier en ligne « Mechanics for Art Conservation », Institut international pour la conservation des objets d'art et d'histoire, décembre 2021.

Karsten, I., S. Michalski, M. Case et J. Ward. « Balancing the Preservation Needs of Historic House Museums and Their Collections Through Risk Management », dans *Proceedings of the Joint Conference of ICOM-DEMIST and Three ICOM-CC Working Groups: The Artifact, Its Context and Their Narrative: Multidisciplinary Conservation in Historic House Museums, Los Angeles (Californie), du 6 au 9 novembre 2012, ICOM-CC, 2012* (sous la direction de K. Seymour et M. Sawicki), s. l., Conseil international des musées – Comité pour la conservation et Comité international pour les demeures historiques-musées, 2012.

Kupczak, A., Ł. Bratasz, J. Kryściak-Czerwenka et R. Kozłowski. « Moisture Sorption and Diffusion in Historical Cellulose-based Materials », *Cellulose*, vol. 25 (avril 2018), p. 2873-2884.

Lafontaine, R. H., et P. A. Wood. « The Stabilization of Ivory against Relative Humidity Fluctuations », *Studies in Conservation*, vol. 27, n° 3 (août 1982), p. 109-117.

Michalski, S. « Relative Humidity: A Discussion of Correct/Incorrect Values », dans *ICOM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting, Washington, D.C., 22–27 August 1993: Preprints* (sous la direction de J. Bridgland), vol. 2, Londres (Royaume-Uni), James & James Ltd./ICOM-CC, 1993, p. 624-629.

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

Michalski, S. « Climate Control Priorities and Solutions for Collections in Historic Buildings », *Historic Preservation Forum*, vol. 12, n° 4 (1998), p. 8-14.

Michalski, S. « Risk Analysis of Backing Boards for Paintings: Damp Climates vs Cold Climates », dans *Minimo intervento conservativo nel restauro dei dipinti: Atti del convegno, Thiene (VI), 29–30 ottobre 2004, Secondo congresso internazionale, Colore e conservazione materiali e metodi nel restauro delle opere policrome mobili* (sous la direction de CESMAR7), Saonara (Italie), Il Prato, 2005, p. 21-27.

Michalski, S. [*The Ideal Climate, Risk Management, the ASHRAE Chapter, Proofed Fluctuations, and Toward a Full Risk Analysis Model*](#) (format PDF; en anglais seulement), dans *Contribution to the Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, April 2007, Tenerife, Spain* (sous la direction de F. Boersma), Los Angeles (Californie), J. Paul Getty Trust, 2007.

Michalski, S. « The Power of History in the Analysis of Collection Risks from Climate Fluctuations and Light », dans *ICOM Committee for Conservation 17th Triennial Meeting, Melbourne, 15–19 September 2014, Preprints* (sous la direction de J. Bridgland), Paris (France), ICOM-CC, 2014, p. 1-8.

Michalski, S. « Climate Guidelines for Heritage Collections: Where We Are in 2014 and How We Got Here », dans [*Proceedings of the Smithsonian Summit on the Museum Preservation Environment*](#) (format PDF; en anglais seulement) [sous la direction de S. Stauderman et W. G. Tompkins], Washington (D.C.), Smithsonian Institution Scholarly Press, 2016, p. 7-32.

Padfield, T. « [Condensation in Film Containers During Cooling and Warming](#) » (format PDF; en anglais seulement), dans *Preserve Then Show* (sous la direction de D. Niseen et coll.), Copenhague (Danemark), The Danish Film Institute, 2002.

Park, G. S., et J. Crank (directeurs de publication). *Diffusion in Polymers*, New York (New York), Academic Press, 1968.

Richard, M. « The Benefits and Disadvantages of Adding Silica Gel to Microclimate Packages for Panel Paintings », dans *Museum Microclimates: Contributions to the Copenhagen Conference 19–23 November 2007* (sous la direction de T. Padfield et coll.), Copenhague (Danemark), National Museum of Denmark, 2007, p. 237-243.

Shashoua, Y. « Storing Plastics in the Cold: More Harm than Good? », dans *ICOM-CC 14th Triennial Meeting, The Hague, The Netherlands, 12–16 September 2005: Preprints* (sous la direction de J. Bridgland), vol. 1, Londres (Royaume-Uni), James & James/Earthscan, 2005, p. 358-364.

Shashoua, Y. *Conservation of Plastics: Materials Science, Degradation and Preservation*, Oxford (Royaume-Uni), Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2008.

Shashoua, Y. « A Safe Place: Storage Strategies for Plastics », *Conservation Perspectives* (printemps 2014), p. 13-15.

Siau, J. F. *Transport Processes in Wood*, Berlin (Allemagne), Springer Science & Business Media, 2012.

Stillwell, S. T. O., et R. A. G. Knight. « Appendix I. An Investigation into the Effect of Humidity Variations on Old Panel Paintings on Wood », dans *Some Notes on Atmospheric Humidity in Relation to Works of Art*, Londres (Royaume-Uni), Camelot Press Limited, 1934, p. 17-34.

Stolow, N. *Controlled Environment for Works of Art in Transit*, Londres (Royaume-Uni), Butterworths, 1996.

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

Thomson, G. « Relative Humidity: Variation with Temperature in a Case Containing Wood », *Studies in Conservation*, vol. 9, n° 4 (novembre 1964), p. 153-169.

Toishi, K. « Humidity Control in a Closed Package », *Studies in Conservation*, vol. 4, n° 3 (août 1959), p. 81-87.

Wu, X.-F., R. A. Jenson et Y. Zhao. « Stress-Function Variational Approach to the Interfacial Stresses and Progressive Cracking in Surface Coatings », *Mechanics of Materials*, vol. 69, n° 1 (2014), p. 195-203.

Types de contrôle de l'ASHRAE

Stefan Michalski

Sur cette page:

- Liste des abréviations
- Introduction
- Spécifications relatives au climat
- Qu'est-ce que la moyenne annuelle?
- Limites du taux d'ajustement saisonnier en raison des limites des variations brèves
- Enjeux en matière de durabilité
- Utilisation de contenants dans lesquels on trouve un microclimat en combinaison avec les systèmes de CVC
- Mauvaise utilisation de la terminologie de l'ASHRAE
- Les zones climatiques de l'ASHRAE
- Spécification AA de l'ASHRAE
 - Définition de la spécification AA de l'ASHRAE
 - Avantages et risques pour la collection de la spécification AA de l'ASHRAE
 - Commentaires sur la spécification AA de l'ASHRAE
 - Exemples de tracé de thermohygrographe pour la spécification AA de l'ASHRAE
- Spécifications A1 et A2 de l'ASHRAE
 - Définition de la spécification A1 de l'ASHRAE
 - Définition de la spécification A2 de l'ASHRAE
 - Avantages et risques pour la collection des spécifications A1 et A2 de l'ASHRAE
 - Commentaires sur les spécifications A1 et A2 de l'ASHRAE
 - Exemples de tracé de thermohygrographe pour la spécification A1 de l'ASHRAE
 - Exemples de tracé de thermohygrographe pour la spécification A2 de l'ASHRAE
- Spécification B de l'ASHRAE
 - Définition de la spécification B de l'ASHRAE
 - Avantages et risques pour les collections de la spécification B de l'ASHRAE
 - Commentaires sur la spécification B de l'ASHRAE
 - Exemple de tracé de thermohygrographe pour la spécification B de l'ASHRAE
- Spécification C de l'ASHRAE
 - Définition de la spécification C de l'ASHRAE
 - Avantages et risques pour les collections de la spécification C de l'ASHRAE
 - Commentaires sur la spécification C de l'ASHRAE
 - Exemple de tracé de thermohygrographe pour la spécification C de l'ASHRAE

- Spécification D de l'ASHRAE
 - Définition de la spécification D de l'ASHRAE
 - Avantages et risques pour les collections de la spécification D de l'ASHRAE
 - Commentaires sur la spécification D de l'ASHRAE
 - Exemple de tracé de thermohygrographe pour la spécification D de l'ASHRAE
- Espace d'exposition temporaire et espace de déballage des objets prêtés
 - Définition d'un espace d'exposition temporaire et d'un espace de déballage des objets prêtés
 - Avantages et risques pour les collections de l'utilisation d'un espace d'exposition temporaire et d'un espace de déballage des objets prêtés
 - Commentaires sur l'utilisation d'un espace d'exposition temporaire et d'un espace de déballage des objets prêtés
- Mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation
 - Définition de la mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation
 - Avantages et risques pour les collections de la mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation
 - Commentaires sur la mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation
- Climats spéciaux pour métal ou verre instable
 - Définition des climats spéciaux pour le métal ou verre instable
 - Avantages et risques pour les collections de l'utilisation de climats spéciaux pour le métal ou verre instable
- Bibliographie

Liste des abréviations

ANSI	American National Standards Institute
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CNÉB	Code national de l'énergie pour les bâtiments
CVC	chauffage, ventilation et climatisation
DJC	degré-jour de chauffage
HR	humidité relative
ICC	Institut canadien de conservation
IPI	Image Permanence Institute
ISO	Organisation internationale de normalisation

Introduction

Depuis la première parution, en 1999, du chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries » du manuel de l'ASHRAE *Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications* (ci-après nommé le « chapitre de l'ASHRAE »), l'Institut canadien de conservation (ICC) a largement contribué au contenu et adopté le cadre et la nomenclature qui y sont énoncés pour offrir des conseils aux professionnels au Canada sur le contrôle du [climat](#) dans les musées.

Dans la présente publication, chacun des types de contrôle de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) est illustré par les limites établies d'un tracé de thermohygrographe. Pour obtenir de plus amples renseignements au sujet du type de contrôle recommandé pour des objets et des collections donnés, consulter ClimaSpec, accessible depuis le menu de gauche.

Dans les éditions de 1999 à 2015 du chapitre de l'ASHRAE, on trouvait des lignes directrices sur la température et l'[humidité relative \(HR\)](#) dans le tableau 3, « Temperature and RH Specifications for Collections », du chapitre sur les musées. Dans l'édition de 2019, ces renseignements sont plutôt présentés dans le tableau 13, « Temperature and Relative Humidity Specifications for Collections in Buildings or Special Rooms ». Bien que la structure générale et les catégories utilisées dans les deux tableaux demeurent très semblables, la révision de 2019 reflète une tendance générale observée dans l'ensemble du chapitre, soit un accent accru mis sur des objectifs locaux tenant compte de la durabilité, plutôt que sur des spécifications universelles fixes.

Dans les éditions de 1999 à 2015, on utilisait l'expression « niveaux de contrôle ». En 2019, on a remplacé cette expression par « types de contrôle » afin de minimiser la fausse impression selon laquelle les types AA, A, B, C et D ou les sous-types « frais », « froid » et « sous le point de congélation » représentent des niveaux hiérarchiques de qualité. Bien que la complexité du système et les coûts énergétiques varient selon les types, chacun d'eux a son utilité selon les collections et les circonstances.

Spécifications relatives au climat

Les spécifications relatives au climat pour la préservation des collections comportent quatre paramètres :

- limites supérieures à long terme ou seuils de danger;
- moyennes annuelles ou valeurs de référence;
- ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle;
- variations brèves et gradients spatiaux.

Dans les éditions de 1999 à 2015 du chapitre de l'ASHRAE, seuls les trois derniers paramètres étaient mentionnés dans le chapitre qui nous intéresse. Le premier y a été ajouté en 2019. Pour en savoir plus sur la raison de la création de ces quatre paramètres, consulter [Aperçu des lignes directrices sur le climat – Annexe A : Les quatre paramètres d'une spécification relative au climat](#). On y présente notamment des données numériques précises sur les quatre paramètres pour chaque type de contrôle.

Qu'est-ce que la moyenne annuelle?

L'expression « moyenne annuelle » utilisée dans le chapitre de l'ASHRAE (éditions de 1999 à 2023) a causé une certaine confusion (l'expression utilisée précédemment, « valeur de consigne », s'était également avérée problématique). Prenons l'exemple d'un utilisateur qui sélectionne une température moyenne annuelle de 20 °C, ainsi qu'une augmentation de 5 °C en été et une diminution de 10 °C en hiver comme ajustements saisonniers maximaux autorisés. En pratique, ces deux ajustements saisonniers se traduiraient par une température de 25 °C en été et de 10 °C en hiver, pour une moyenne annuelle de 17,5 °C. On peut alors se demander si on a plutôt appliqué une augmentation de 7,5 °C en été à une moyenne de 17,5 °C. Par souci de clarté dans les exemples détaillés de tracés de thermohygrographes fournis dans la présente publication, l'ICC utilise l'expression « valeur de référence annuelle » là où l'on trouve « moyenne annuelle » dans l'édition de 2019 et celle de 2023 du chapitre de l'ASHRAE.

Limites du taux d'ajustement saisonnier en raison des limites des variations brèves

C'est dans l'édition de 2019 et celle de 2023 du manuel de l'ASHRAE que l'on définit, pour la première fois, les « variations brèves », soit « [...] toute variation plus courte que les durées précisées [...] pour le taux d'ajustement saisonnier (c'est-à-dire 30 jours pour les variations de l'humidité relative et 7 jours pour les variations de température) » [traduction libre]. Comme la durabilité occupe une place de plus en plus importante et qu'il est entendu que les ajustements saisonniers entraînent des économies d'énergie supplémentaires, l'interprétation des « variations brèves » devient particulièrement importante pour la mise en œuvre de grands changements saisonniers sur de courtes périodes.

Les membres du comité de rédaction de l'édition de 2019 se sont longuement demandé si les limites des variations brèves de température avaient été fixées de manière trop restrictive pour les types de contrôle AA, A1, A2 et B. La discussion a porté principalement sur la nécessité de promouvoir la durabilité et sur l'absence de preuve, dans la documentation, que les variations de température précisées, et même des variations plus importantes, risquent d'entraîner des dommages mécaniques.

La justification de ces faibles seuils de tolérance de température ne repose pas sur les effets de la température en soi, mais plutôt sur les variations de l'HR qu'elle provoque à proximité des objets. Si

les changements de température surviennent à une vitesse supérieure au temps de réaction thermique d'un objet, ou au temps de réaction dont a besoin le système de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) pour ajuster la teneur en humidité (point de rosée) de l'air, l'HR à la surface de l'objet peut fluctuer jusqu'à 3 % par variation de 1 °C. Prenons l'exemple d'une variation de 6 % de l'HR pour un écart de température de 2 °C : il faudrait réduire les écarts de température susceptibles d'avoir ces effets sur l'HR à ± 2 °C afin de respecter la limite à court terme de ± 5 % d'HR.

Pour établir un taux d'ajustement sûr de la température, il faut partir du principe suivant : le temps de réaction thermique de la plupart des objets va de quelques heures à quelques jours, tout comme celui de la plupart des bâtiments. Au cours d'une semaine, les objets et les matériaux du bâtiment peuvent donc retrouver l'équilibre à la suite d'un soudain ajustement de la température du système de CVC. Si l'on maintient les ajustements hebdomadaires de la température à ± 2 °C, l'écart d'HR à la surface des objets (et des matériaux du bâtiment) ne dépassera pas ± 5 % d'HR.

Enjeux en matière de durabilité

La question du [contrôle du climat](#) qui préoccupe le plus les restaurateurs est l'HR, sauf dans le cas des collections d'archives (la température est alors la principale préoccupation). Cependant, pour les ingénieurs qui cherchent à réaliser des économies d'énergie, c'est tout le contraire : les exigences en matière de température et de ventilation sont leurs principales préoccupations. Pour concilier les besoins des deux groupes, l'édition de 2019 du manuel de l'ASHRAE propose deux nouvelles lignes directrices : définir une valeur de référence annuelle adaptée au climat local et procéder à des ajustements saisonniers de la température. La croyance traditionnelle selon laquelle la préservation de collections mixtes repose sur des températures demeurant stables à l'année s'est révélée fausse. Pour établir des températures de référence très différentes des conditions de confort humain et procéder à d'importants ajustements saisonniers, il faut séparer les réserves des salles occupées. (On peut réduire le risque dû à la transition entre les réserves et les espaces d'exposition lorsque les objets subissent en fait un vaste gradient spatial. Il convient alors d'emballer et d'isoler les objets pendant le transport, conformément à la procédure à suivre pour le transport extérieur et la récupération dans une réserve fraîche ou froide.)

L'une des principales causes de l'inefficacité énergétique des systèmes de CVC traditionnels dans les musées était la succession de cycles de chauffage et de refroidissement (et les processus d'humidification et de déshumidification connexes), en particulier pendant les saisons intermédiaires (printemps et automne). Les conceptions écoénergétiques prévoient une plage d'inactivité, c'est-à-dire une fourchette étroite de températures et de taux d'humidité séparant les paramètres des deux systèmes. Chaque système peut dépasser légèrement ses paramètres sans déclencher le système opposé. Cette approche est encore plus efficace si le bâtiment est bien isolé et hermétique et qu'il contient de vastes collections composées de matières hygroscopiques, c'est-à-dire pouvant agir comme un grand réservoir de chaleur et d'humidité. Dans ce type de conception efficace, où chaque

système fonctionnant seul entraîne très peu de variations, la ligne directrice de l'ASHRAE relative aux variations brèves peut servir à établir la plage d'inactivité admissible. Pour en savoir plus sur les économies d'énergie pouvant être réalisées grâce aux plages d'inactivité appropriées, consulter la norme ASHRAE 90.1-2019, *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*.

Un dernier enjeu en matière de durabilité vient du bâtiment lui-même, non seulement les bâtiments du patrimoine mais tout le parc immobilier. Par le passé, une approche rigoureuse en matière de contrôle de la température et de l'HR pour les collections a amené de nombreux établissements du patrimoine (bien plus souvent que d'autres établissements) à endommager par inadvertance leurs bâtiments en cas de présence de condensation entre les murs. Dans les climats froids, l'humidification hivernale causait de la condensation dans les murs; dans les climats chauds et humides, la climatisation estivale faisait de même. Les ajustements saisonniers de la température permettent non seulement d'économiser de l'énergie, mais aussi de sauver des bâtiments. Il convient de profiter pleinement des ajustements saisonniers autorisés et des valeurs d'HR suggérées dans le chapitre de l'ASHRAE qui nous intéresse.

L'ICC a réalisé une première enquête sur la consommation d'énergie des musées au Canada. Les résultats obtenus laissent croire que les établissements exerçant le niveau de contrôle du climat le plus élevé consomment de deux à trois fois plus d'énergie que ceux qui n'exercent qu'un contrôle de base en vue du confort humain. Plusieurs facteurs contribuent probablement à l'augmentation de la consommation d'énergie et à sa variabilité, de sorte qu'il est impossible d'affirmer, de manière définitive, que les objectifs de contrôle du climat sont à eux seuls le facteur déterminant.

L'intensité énergétique des établissements du patrimoine canadiens sera révélée plus clairement au fur et à mesure que les données pertinentes seront recueillies grâce à l'[Enquête sur l'utilisation commerciale et institutionnelle de l'énergie](#), et intégrées dans l'[ENERGY STAR Portfolio Manager](#) aux fins de suivi et d'établissement de données de référence en matière de consommation énergétique. Mais nous savons déjà certaines choses. Les musées qui utilisent toujours une spécification traditionnelle pour le niveau le plus élevé de contrôle du climat (plutôt qu'une spécification adaptée au climat local) ne font pas d'ajustements saisonniers et ne vérifient pas leurs systèmes afin d'en améliorer l'efficacité. Ces musées gaspillent de l'énergie et n'agissent pas de manière durable. Les grands musées peuvent profiter de l'adoption des outils d'analyse du rendement (par exemple, [RETScreen](#), créé par le gouvernement du Canada) que d'autres établissements ont utilisés pour atteindre leurs cibles d'efficacité énergétique. Pour en savoir plus, communiquer avec l'ICC.

Utilisation de contenants dans lesquels on trouve un microclimat en combinaison avec les systèmes de CVC

Il est toujours difficile de contrôler, à la fois, la température et l'HR grâce au système de CVC d'un bâtiment, et il est impossible d'éviter absolument toute défaillance. La façon la plus sûre de limiter les variations de l'HR, en particulier les très forts pics résultant de défaillances de système, consiste à utiliser des [contenants dans lesquels on trouve un microclimat](#) (vitrines, armoires, cadres étanches, sacs de plastique, etc.). De nombreux documents, dans le domaine de la conservation, expliquent les techniques liées aux contenants dans lesquels on trouve un microclimat et les pièges connexes à éviter. Dans le Bulletin technique 33 [Gel de silice : contrôle passif de l'humidité relative](#), on explique l'utilisation de matériaux tampons.

L'utilisation de contenants dans lesquels on trouve un microclimat n'est pas seulement recommandée aux établissements incapables de contrôler l'HR dans leur bâtiment. On la recommande également à ceux dont la collection comporte des objets précieux qui risquent d'être endommagés en cas de défaillance du système de pointe; à ceux qui maintiennent une HR de 50 % pour leur collection mixte, mais qui ont aussi dans leurs réserves des métaux corrodés ou des objets de verre suintant qui risquent d'être endommagés à ce niveau d'HR; et aux gros établissements qui souhaitent prêter des objets à des établissements plus petits dont les bâtiments ne disposent pas du contrôle de l'HR requis.

Mauvaise utilisation de la terminologie de l'ASHRAE

Il est devenu habituel d'utiliser les spécifications des types de contrôle de l'ASHRAE comme raccourcis pour décrire le rendement d'un système. Il peut cependant être trompeur d'affirmer : « Mon système est AA la plupart du temps. » Tout dommage mécanique causé à la collection est le résultat des pires heures et journées de chaque année, et non des conditions adéquates maintenues les 99 % du temps restant. Chaque type de contrôle de l'ASHRAE s'applique 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, année après année. Dans tout bâtiment, même un bâtiment historique ne faisant l'objet d'aucun contrôle, il peut y avoir des jours ou même des semaines où le climat respecte un type de contrôle en particulier. Cela ne signifie pas pour autant que le bâtiment et ses systèmes respectent ce type particulier de contrôle. Il s'agit d'une façon très différente de voir les choses par comparaison aux systèmes de CVC conçus pour le confort humain; on accepte alors généralement des conditions ne respectant pas la spécification pour 1 % (ou 3 %) de l'année (tolérances de conception conventionnelles).

Il est cependant acceptable et logique de faire l'une des affirmations suivantes : « Mon établissement respecte toujours les conditions AA en été, période au cours de laquelle nous avons demandé le prêt. » ou « L'intérieur de cette vitrine hermétique respecte les conditions A1 à l'année grâce à une combinaison du contrôle de température fourni par les systèmes de la salle et du contrôle de l'HR fourni par le [contenant de protection](#). »

La définition exacte de l'expression « la plupart du temps », par exemple 99 % ou 97 % du temps chaque année ou chaque décennie, n'a pas été officialisée dans le chapitre de l'ASHRAE. Il s'agit d'une question complexe. Ce qui est établi, cependant, d'un point de vue de la [gestion des risques](#), c'est que tout objet précieux très sensible aux variations de l'HR doit être conservé dans un contenant dans lequel on trouve un microclimat.

Les zones climatiques de l'ASHRAE

Dans les éditions de 2019 et de 2023 du chapitre de l'ASHRAE, on utilise les zones climatiques pour fournir des conseils sur le type de contrôle réalisable dans différents endroits et sur le rendement nécessaire de l'enveloppe du bâtiment pour effectuer ce contrôle. Pour les projets d'immobilisation importants, et chaque fois qu'un projet demande la participation d'un ingénieur ou d'un architecte, le chapitre actuel de l'ASHRAE ainsi que les codes de construction locaux et nationaux doivent être consultés. Voici un bref résumé pour les non-spécialistes.

Il existe de nombreuses cartes différentes de zones climatiques. Les plus connues sont probablement celles destinées aux jardiniers, dont les nombres les plus élevés correspondent à des climats plus chauds. L'ASHRAE a créé son propre système (figure 1) pour la conception des systèmes de CVC, avec des chiffres plus élevés pour les climats plus froids. Il est basé sur quatre facteurs climatiques, dont l'un est la quantité de chauffage nécessaire pendant la saison froide (degré-jour de chauffage [DJC] inférieur à 18 °C). L'ASHRAE a publié des cartes et des tableaux de zones pour des endroits du monde entier, y compris des centaines d'endroits au Canada (ASHRAE, 2021). Le code du bâtiment du Canada ainsi que de nombreux codes provinciaux se reportent aux données du Code national de l'énergie pour les bâtiments – Canada (CNÉB) qui définit les zones en fonction uniquement des DJC. Pour les zones de l'ASHRAE qui intéressent le Canada (figure 1), les zones du CNÉB sont très similaires, mais ne comportent pas la séparation en A, en B et en C en raison des différences de précipitations. Les données sur les DJC pour le Canada qui tiennent également compte des effets des changements climatiques sont facilement accessibles en ligne, par exemple sur le portail de données climatiques appelé donneesclimatiques.ca.

Le tableau 1 résume les stratégies à adopter, par zone climatique, pour répondre aux exigences de chaque type de contrôle de l'ASHRAE (2023). Il contient des renseignements abrégés de l'ASHRAE ainsi que des stratégies autres que la conception de l'enveloppe du bâtiment. Le tableau peut encore être simplifié : les types de contrôle AA et A de l'ASHRAE nécessitent une enveloppe de bâtiment spéciale. Les contrôles C et D de l'ASHRAE sont des options réalistes (et très durables) pour tous les bâtiments historiques. Le contrôle B de l'ASHRAE est réalisable dans les bâtiments anciens se trouvant dans les zones les plus chaudes (4 et 5), mais il est hors de portée pour la majeure partie du Canada (zones 6 à 8).

Tableau 1 : Stratégies de construction pour toutes les zones climatiques du Canada

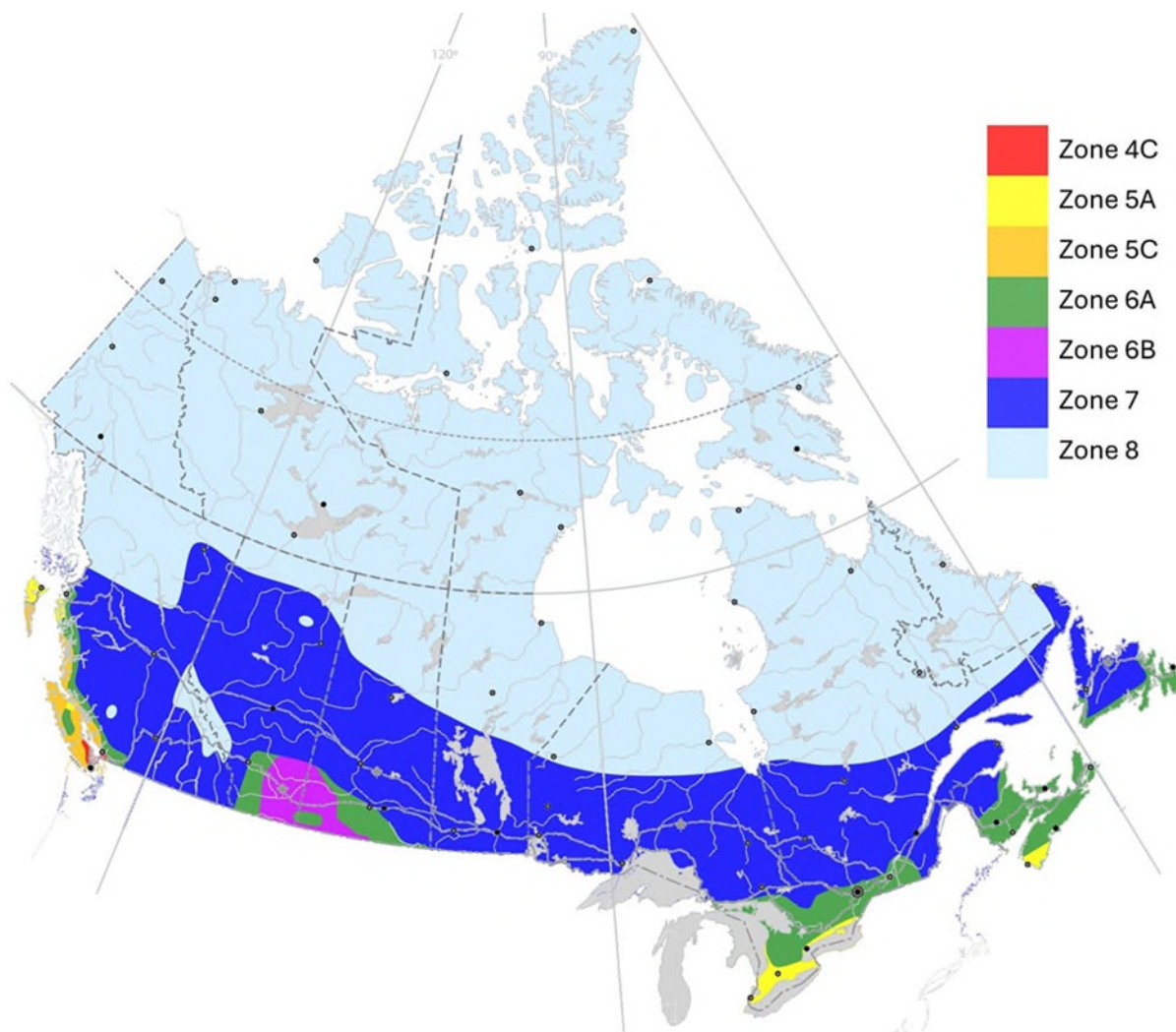
Type of contrôle	Zones climatiques	Stratégies
AA	Tout le Canada : 4C, 5A, 5C, 6A, 6B, 7 et 8	Construire un bâtiment spécialisé avec une conception d'enveloppe spéciale, par exemple une étanchéité à l'air et une isolation inhabituelles. Le besoin pour un bâtiment spécialement conçu à cet effet augmente quand le nombre de la zone augmente. Pour la modernisation des structures historiques, il convient d'utiliser une approche « boîtier dans un boîtier », c'est-à-dire des salles intérieures contrôlées séparément (van Schijndel, 2010) ou une solution de zone tampon dynamique (Pasqualini, 1999). Utiliser les micro-environnements pour un contrôle fiable de l'HR à long terme (par exemple, pendant des décennies) ou pour les matériaux présentant des exigences particulières en matière d'HR, tels les métaux corrodés.
A1 et A2	5A, 5C, 6A, 6B, 7 et 8	Comme AA.
A1 et A2	4C (uniquement près de Victoria (C.-B.))	Comme AA, mais il est possible d'assouplir un peu les exigences relatives à la conception de l'enveloppe.
B	4C, 5A et 5C	Si la température est contrôlée pour assurer le confort humain en hiver, les bâtiments historiques peuvent survivre sans travaux de rénovation, mais une analyse minutieuse de l'enveloppe et quelques travaux de rénovation peuvent s'avérer nécessaires. Si le chauffage est contrôlé par un humidostat, un rendement moyen de l'enveloppe peut suffire. Utiliser des micro-environnements pour réduire les variations de l'HR ou pour les matériaux présentant des exigences particulières en matière d'HR, tels les métaux corrodés.



B	6A, 6B, 7 et 8	Si la température est réglée pour assurer le confort humain en hiver, suivre les conseils pour le contrôle AA. Si le chauffage est contrôlé par un humidostat, un rendement moyen de l'enveloppe peut suffire. Utiliser des micro-environnements pour réduire les variations de l'HR ou pour les matériaux présentant des exigences particulières en matière d'HR, tels les métaux corrodés.
C	Tout le Canada : 4C, 5A, 5C, 6A, 6B, 7 et 8	Une conception de l'enveloppe équivalente à celle des bâtiments résidentiels performants dans cette zone climatique est suffisante, car les humains et les objets ont besoin d'une HR supérieure à 25 % et inférieure à 75 %. Il peut s'avérer nécessaire de moderniser les bâtiments historiques lorsque le nombre de la zone est plus élevé. Utiliser des micro-environnements pour réduire les variations de l'HR ou pour les matériaux présentant des exigences particulières en matière d'HR, tels les métaux corrodés.
D	Tout le Canada : 4C, 5A, 5C, 6A, 6B, 7 et 8	Si la température peut suivre la moyenne journalière extérieure (par exemple, dans les bâtiments non isolés), seule une bonne étanchéité à l'air est nécessaire pour permettre aux systèmes de déshumidification de fonctionner. Dans les zones ayant le suffixe B (sec), une ventilation intelligente peut suffire. Utiliser des micro-environnements pour réduire les variations de l'HR ou pour les matériaux présentant des exigences particulières en matière d'HR, tels les métaux corrodés.



Frais Froid Congelé Contrôle de l'HR	Tout le Canada : 4C, 5A, 5C, 6A, 6B, 7 et 8	Une conception spéciale de l'enveloppe est essentielle, par exemple une étanchéité à l'air et une isolation inhabituelles. L'utilisation d'une approche « boîtier dans un boîtier » (c'est-à-dire des salles intérieures isolées et contrôlées séparément) est une solution courante. Si les zones de confort humain chauffées ne sont pas nécessaires, il est possible de mettre des objets dans une réserve au frais ou au froid à faible coût en suivant simplement les températures extérieures moyennes dans les zones 7 et 8. Utiliser des micro-environnements pour réduire les variations de l'HR et éviter une HR extrême en cas de défaillance des systèmes.
--	---	--



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0037

Figure 1. Zones climatiques du Canada basées sur l'ASHRAE (2021).

Description de la figure 1

La figure 1 montre une carte du Canada avec les différentes zones climatiques de l'ASHRAE représentées avec différentes couleurs.

Spécification AA de l'ASHRAE

Définition de la spécification AA de l'ASHRAE

Tous les paramètres et toutes les indications concernant les avantages et les risques sont tirés de l'ASHRAE (2023).

Types de collections et de bâtiments : musées, archives et bibliothèques dans des bâtiments ou des salles modernes spécialisés. La température correspond aux conditions de confort humain, ou presque.

Type de contrôle : contrôle de précision sans ajustement saisonnier de l'HR

Tableau 2 : Les quatre paramètres de la spécification AA de l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
De 10 °C à 25 °C	• Pour les collections permanentes : moyenne annuelle historique de température • Pour les aires d'exposition publiques : les températures peuvent correspondre aux conditions de confort humain	• Hausse de 5 °C • Baisse de 5 °C	±2°C
HR de 35 % à 65 %	• Pour les collections permanentes : moyenne annuelle historique d'HR	• Aucune variation de l'HR	±5 % d'HR

Avantages et risques pour la collection de la spécification AA de l'ASHRAE

Les avantages pour la collection incluent la prévention de la germination et de la croissance de moisissures, de même que la prévention d'une corrosion rapide. La plupart des objets et des peintures ne courent aucun risque de subir des dommages mécaniques. Toutefois, certains métaux, verres et minéraux peuvent se dégrader si l'HR dépasse une valeur critique. À 20 °C, les objets instables sur le plan chimique se détériorent passablement en quelques décennies. Chaque hausse de la température de 5 °C double la vitesse de détérioration. Pour en savoir plus sur les avantages et risques précis associés à différentes conditions de température et d'HR pour des objets donnés, consulter ClimaSpec.

Commentaires sur la spécification AA de l'ASHRAE

Dans les éditions de 1999 à 2015 du chapitre de l'ASHRAE, les définitions d'« ajustements saisonniers » et de « variations brèves » n'ont pas changé. Les changements apportés dans l'édition de 2019 incluent l'ajout de limites supérieure et inférieure à long terme et un accent plus marqué sur les moyennes annuelles historiques en tant que paramètre approprié, plutôt qu'un paramètre par défaut de 50 % d'HR et de 15 °C à 25 °C.

Le type de contrôle AA s'appuie toujours sur les lignes directrices traditionnelles très étroites des dernières décennies, mais permet un faible ajustement saisonnier des températures. Il ne faut cependant pas l'interpréter comme la norme parfaite. En effet, cette spécification ne tient pas compte de problèmes considérables liés aux matériaux chimiquement instables des collections du XX^e siècle (qui ont avantage à être conservés dans des conditions plus fraîches et plus sèches), et rien ne prouve qu'elle diminue véritablement les risques mécaniques pour les collections par rapport aux types de contrôle A1 ou A2. De plus, aucun établissement, dans le monde entier, n'a réussi à prouver qu'il avait respecté les conditions AA dans toute une salle sur de nombreuses années. Même les systèmes qui limitent les variations en fonction de la spécification AA pendant 97 % du temps dépassent les limites plusieurs jours par année et plusieurs semaines par décennie. Il s'agit donc d'une cible ambitieuse pour les établissements disposant de bâtiments spécialisés situés dans une zone climatique tempérée.

Du point de vue de la gestion des risques, il ne faut pas tenter d'atteindre cette cible dans les situations suivantes :

- les ressources allouées au système et à son fonctionnement pourraient être utilisées plus efficacement pour réduire des risques plus graves liés à la collection;
- son application pourrait causer des dommages à un bâtiment historique dont la valeur est semblable à celle de la collection ou plus grande;

- son application pourrait entraîner de grandes dépenses énergétiques en raison des failles de l'enveloppe du bâtiment.

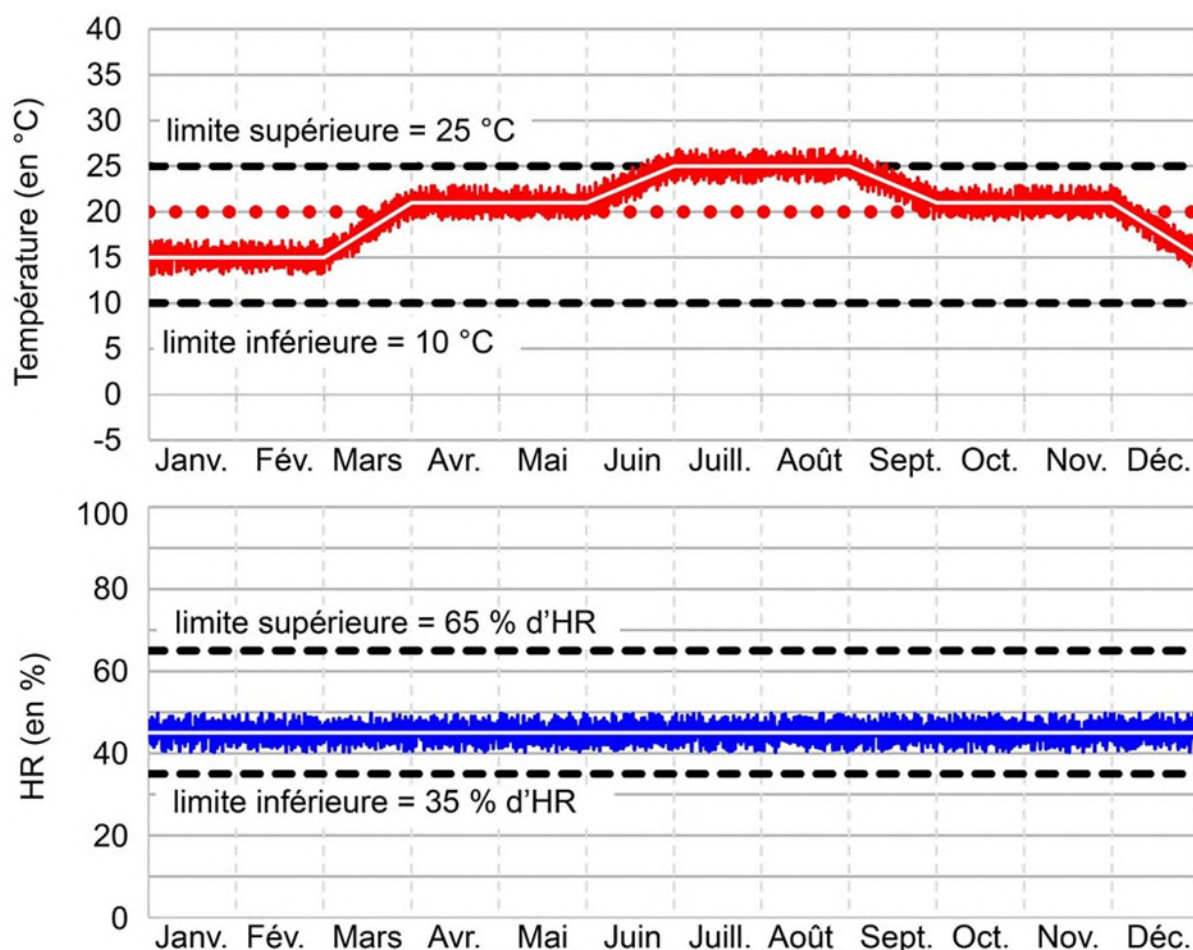
Pour obtenir des recommandations sur la façon d'exprimer le respect de la spécification AA (ou de toute autre ligne directrice de l'ASHRAE), par exemple « Mon système est AA la plupart du temps. », consulter [Mauvaise utilisation de la terminologie de l'ASHRAE](#).

Exemples de tracé de thermohygrographe pour la spécification AA de l'ASHRAE

Exemple 1

Sur la figure 2, la valeur de référence annuelle pour la température est de 20 °C (ligne rouge pointillée), et les ajustements saisonniers ont été fixés à une hausse et à une baisse maximales de 5 °C. Ces paramètres pourraient être utilisés pour la mise en réserve des collections : température hivernale de 15 °C en janvier et en février et température estivale de 25 °C en juillet et en août. La température est réglée à 21 °C à l'automne et au printemps. Comme les ajustements saisonniers ne sont pas symétriques, la moyenne annuelle réelle est de 20,5 °C. Cet exemple illustre une situation dans laquelle le système a des paramètres pleinement programmables, de sorte qu'il est possible d'ajuster la température de réglage (ligne blanche avec oscillations rouges) par étape, par exemple de deux à trois fois par semaine pendant les mois de mars, de juin, de septembre et de décembre. Il convient de noter que la limite supérieure à long terme de température, soit 25 °C, s'applique à la température de réglage (ligne blanche), et non aux pics des variations brèves qui dépassent la limite.

(Il est à noter que les graphiques dans la présente ressource sont idéalisés de sorte à illustrer plus clairement la spécification dans un climat canadien type.)



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0002

Figure 2. Exemple de graphiques montrant la température et l'HR sur une année dans un bâtiment où le personnel a choisi les ajustements saisonniers maximaux et les variations brèves maximales que permet le type de contrôle AA de l'ASHRAE, tout en faisant quelques ajustements de température importants mais lents.

Description de la figure 2

La figure 2 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale qui monte et descend graduellement de mois en mois, mais à laquelle sont surimposées de nombreuses variations brèves. Deux lignes horizontales pointillées représentent les limites supérieure et inférieure. Le graphique d'HR montre un ensemble semblable de courbes, mais la courbe principale est horizontale.

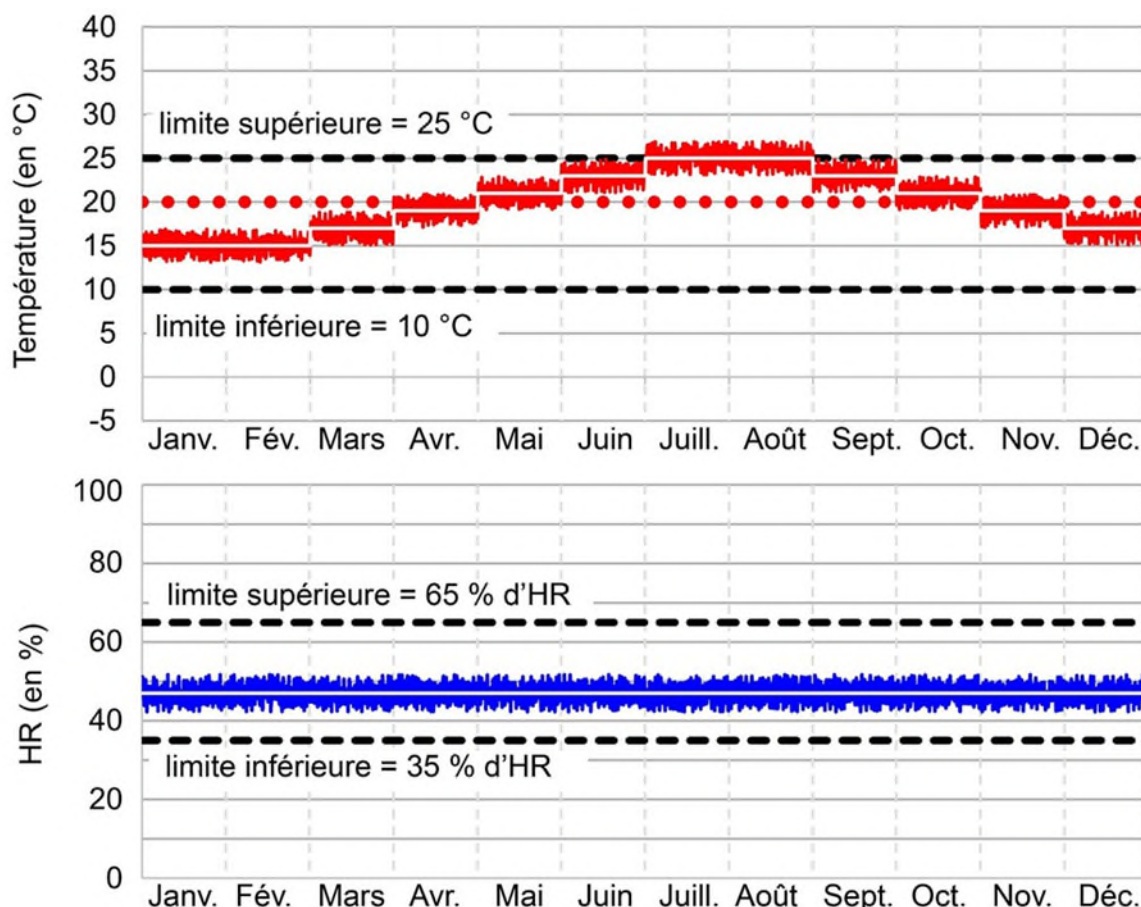
Les ajustements saisonniers des paramètres de température à la figure 2 (hausse graduelle de 6 °C au mois de mars et baisse graduelle de 6 °C au cours du mois de décembre) peuvent sembler enfreindre la limite de variation brève de ± 2 °C pour la spécification AA. Cet ajustement de 6 °C ne serait certainement pas autorisé s'il était fait d'un coup le 1^{er} mars et le 1^{er} décembre. Comme il en est question sous [Limites du taux d'ajustement saisonnier en raison des limites des variations brèves](#), l'ICC considère qu'un ajustement graduel ne dépassant pas la limite de variation brève de ± 2 °C par semaine respecte l'intention des lignes directrices de l'ASHRAE.

Sur la figure 2, la valeur de référence annuelle pour l'HR et la moyenne annuelle réelle sont identiques, soit 45 % d'HR. Aucun ajustement saisonnier n'est effectué (ligne blanche horizontale avec oscillations en bleu).

Exemple 2

Sur la figure 3, la valeur de référence annuelle pour la température est de 20 °C (ligne rouge pointillée). Les plateaux hivernal et estival sont les mêmes que ceux de la figure 2 et pourraient être utilisés pour la mise en réserve de la collection, mais ici, des ajustements saisonniers sont effectués une fois par mois, par bonds de 2 °C. Ces ajustements se situent dans les limites des variations brèves permises de 2 °C. Comme les ajustements mensuels sont symétriques, la moyenne annuelle réelle est, elle aussi, de 20 °C. Il est à noter que la température limite supérieure à long terme, de 25 °C, s'applique à la température de réglage (ligne blanche), et non aux pics des variations brèves qui dépassent la limite.

Un ajustement aussi lent des températures n'est pas très écoénergétique si les conditions climatiques locales varient plus brusquement de l'hiver à l'été. L'avantage de procéder graduellement à un ajustement plus important de la température sur une période d'un mois, comme illustré à la figure 2, est que l'on suit alors de plus près un climat marqué par des changements rapides des températures saisonnières (ou des changements brusques dans l'occupation et l'accès selon les saisons).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0004

Figure 3. Exemple de graphiques montrant la température et l'HR sur une année dans un bâtiment où le personnel a choisi les ajustements saisonniers maximaux et les variations brèves maximales que permet le type de contrôle AA de l'ASHRAE, tout en faisant de nombreux ajustements de température brusques mais minimes.

Description de la figure 3

La figure 3 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale qui monte et descend par étape, de mois en mois, et à laquelle sont surimposées des variations brèves. Deux lignes horizontales pointillées représentent les limites supérieure et inférieure. Le graphique représentant l'HR montre un ensemble semblable de courbes, mais la courbe principale est horizontale.

Sur la figure 3, la valeur de référence annuelle pour l'HR a été réglée à 47 % à l'année (ligne blanche). La moyenne annuelle réelle est identique. Un paramètre d'HR de 47 % n'entraînera pas de problème de condensation en hiver dans ce bâtiment, puisqu'on permet à la température de

descendre à 15 °C. En été, le système de déshumidification est capable de garder l'HR à 47 % parce qu'on permet à la température de s'élever à 25 °C.

Spécifications A1 et A2 de l'ASHRAE

Les spécifications A1 et A2 s'accompagnent des mêmes avantages et risques pour les collections, mais sont légèrement différentes en ce qui a trait à la combinaison de variations saisonnières et brèves de l'HR. Avant la publication de l'édition de 2019 du chapitre de l'ASHRAE, ces combinaisons étaient toutes deux appelées A, ce qui risquait de causer de la confusion.

Définition de la spécification A1 de l'ASHRAE

Types de collections et de bâtiments : musées, archives et bibliothèques dans des bâtiments ou des salles modernes spécialisés. La température correspond aux conditions de confort humain, ou presque.

Type de contrôle : contrôle de précision avec variation saisonnière de la température et de l'HR

Tableau 3 : Les quatre paramètres de la spécification A1 de l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
De 10 °C à 25 °C	- Pour les collections permanentes : moyenne annuelle historique de température - Pour les aires d'exposition publiques : les températures peuvent correspondre aux conditions de confort humain	- Hausse de 5 °C - Baisse de 10 °C	±2 °C
HR de 35 % à 65 %	Pour les collections permanentes : moyenne annuelle historique d'HR	- Hausse de 10 % - Baisse de 10 %	±5 % d'HR

Définition de la spécification A2 de l'ASHRAE

Types de collections et de bâtiments : musées, archives et bibliothèques dans des bâtiments ou des salles modernes spécialisés. La température correspond aux conditions de confort humain, ou presque.

Type de contrôle : contrôle de précision avec variation saisonnière de la température seulement

Tableau 4 : Les quatre paramètres de la spécification A2 de l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
De 10 °C à 25 °C	• Pour les collections permanentes : moyenne annuelle historique de température • Pour les aires d'exposition publiques : les températures peuvent correspondre aux conditions de confort humain	• Hausse de 5 °C • Baisse de 10 °C	±2 °C
HR de 35 % à 65 %	• Pour les collections permanentes : moyenne annuelle historique d'HR	• Aucune variation de l'HR	±10 % d'HR

Avantages et risques pour la collection des spécifications A1 et A2 de l'ASHRAE

Les avantages pour la collection incluent la prévention de la germination et de la croissance de moisissures, de même que la prévention d'une corrosion rapide. La plupart des objets, des peintures, des photos et des livres ne courent aucun risque de subir des dommages mécaniques. Il existe cependant un risque faible pour les objets ayant une [sensibilité](#) élevée. (Selon les définitions actuelles, les spécifications A1 et A2 entraîne le même risque faible d'endommagement mécanique pour les collections vulnérables. En effet, on estime qu'un ajustement saisonnier lent de 10 % de l'HR entraîne les mêmes risques mécaniques qu'une variation rapide de 5 % en raison de l'importante relaxation des contraintes qui se produit dans les trois mois d'une transition lente.) À 20 °C, les objets chimiquement instables se détériorent passablement en quelques décennies. Chaque hausse de la température de 5 °C double la vitesse de détérioration. Pour en savoir plus sur les avantages et

risques précis de différentes conditions de température et d'HR pour des objets donnés, consulter ClimaSpec.

Commentaires sur les spécifications A1 et A2 de l'ASHRAE

Dans l'édition de 2019 du chapitre de l'ASHRAE, on a donné des noms distincts aux deux sous-catégories : type A1 et type A2. Les ajustements saisonniers et les variations brèves permis en fonction du type A sont demeurés inchangés dans les éditions de 1999 à 2015. Toutefois, l'édition de 2019 introduit des limites supérieure et inférieure à long terme et met davantage l'accent sur les moyennes annuelles historiques comme valeur de référence annuelle appropriée, plutôt qu'un réglage par défaut de 50 % d'HR et de 15 °C à 25 °C.

La lettre « A » a été choisie comme désignation dans l'édition de 1999 parce qu'on considérait que ce niveau était suffisant pour les grands établissements qui abritent des collections mixtes dans un bâtiment spécialisé et qui ont pour mandat de maximiser la préservation. Le comité de rédaction du chapitre de l'ASHRAE et l'ICC sont toujours de cet avis.

Les risques mécaniques mentionnés sous [Avantages et risques pour la collection des spécifications A1 et A2 de l'ASHRAE](#) s'appliquent uniquement aux objets qui n'ont jamais été exposés à des variations depuis leur fabrication ou leur réparation. Un objet qui a été exposé à une importante variation se sera fissuré au maximum en un seul cycle de variation de la même ampleur. Pour en savoir plus, consulter [Aperçu des lignes directrices sur le climat – Annexe B : Sensibilité aux variations et application des variations démontrées](#).

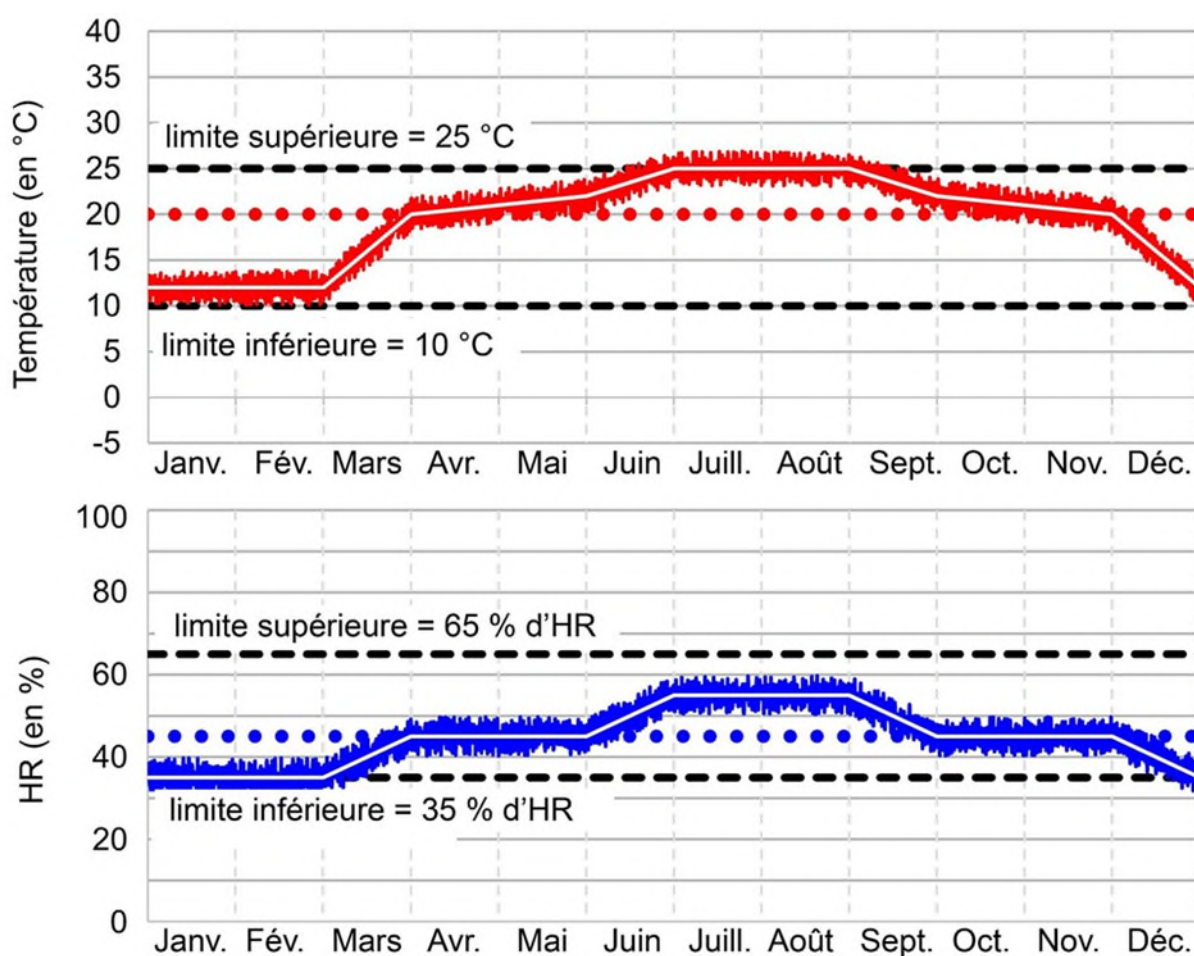
Les ajustements saisonniers plus marqués des spécifications A1 et A2 (par rapport aux spécifications AA) sont un rappel que même les grands musées doivent respecter des contraintes en matière d'énergie et de durabilité, et que de tels ajustements des températures ne posent pas de risque véritable pour la plupart des collections. Cela dit, maintenir les spécifications A1 ou A2 pour une collection donnée demeure une tâche nécessitant beaucoup de ressources dans la plupart des climats canadiens. Compte tenu du phénomène des variations démontrées, le contrôle de type B est suffisant pour de nombreuses collections permanentes.

Exemples de tracé de thermohygrographe pour la spécification A1 de l'ASHRAE

Exemple 1

Sur la figure 4, la valeur de référence annuelle pour la température est de 20 °C (ligne rouge pointillée). Les ajustements saisonniers suivent les paramètres typiquement utilisés dans une réserve : réglage hivernal de 12 °C en janvier et en février et réglage estival de 25 °C en juillet et en

août. Les températures, au printemps, sont ajustées graduellement jusqu'au maximum estival de 25 °C, avant d'être abaissées. Le système est pleinement programmable, de sorte que l'on peut ajuster la température (ligne blanche) par étape, par exemple deux fois par semaine. Les plus fortes transitions, une hausse de 8 °C en mars et une baisse de 8 °C en décembre, respectent tout juste les suggestions de l'ICC selon lesquelles les ajustements saisonniers ne doivent pas dépasser un taux de 2 °C par semaine. La moyenne annuelle réelle découlant de ces paramètres, soit 19,8 °C, se rapproche de la valeur de référence annuelle. Il est à noter que la limite supérieure à long terme de 25 °C s'applique à la température de réglage (ligne blanche), et non aux pics des variations brèves qui dépassent la limite.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0006

Figure 4. Exemple de graphiques montrant la température et l'HR sur une année complète dans un bâtiment où le personnel a choisi les ajustements saisonniers maximaux et les variations brèves maximales que permet le type de contrôle A1 de l'ASHRAE, tout en faisant quelques ajustements de température et d'HR importants mais lents.

Description de la figure 4

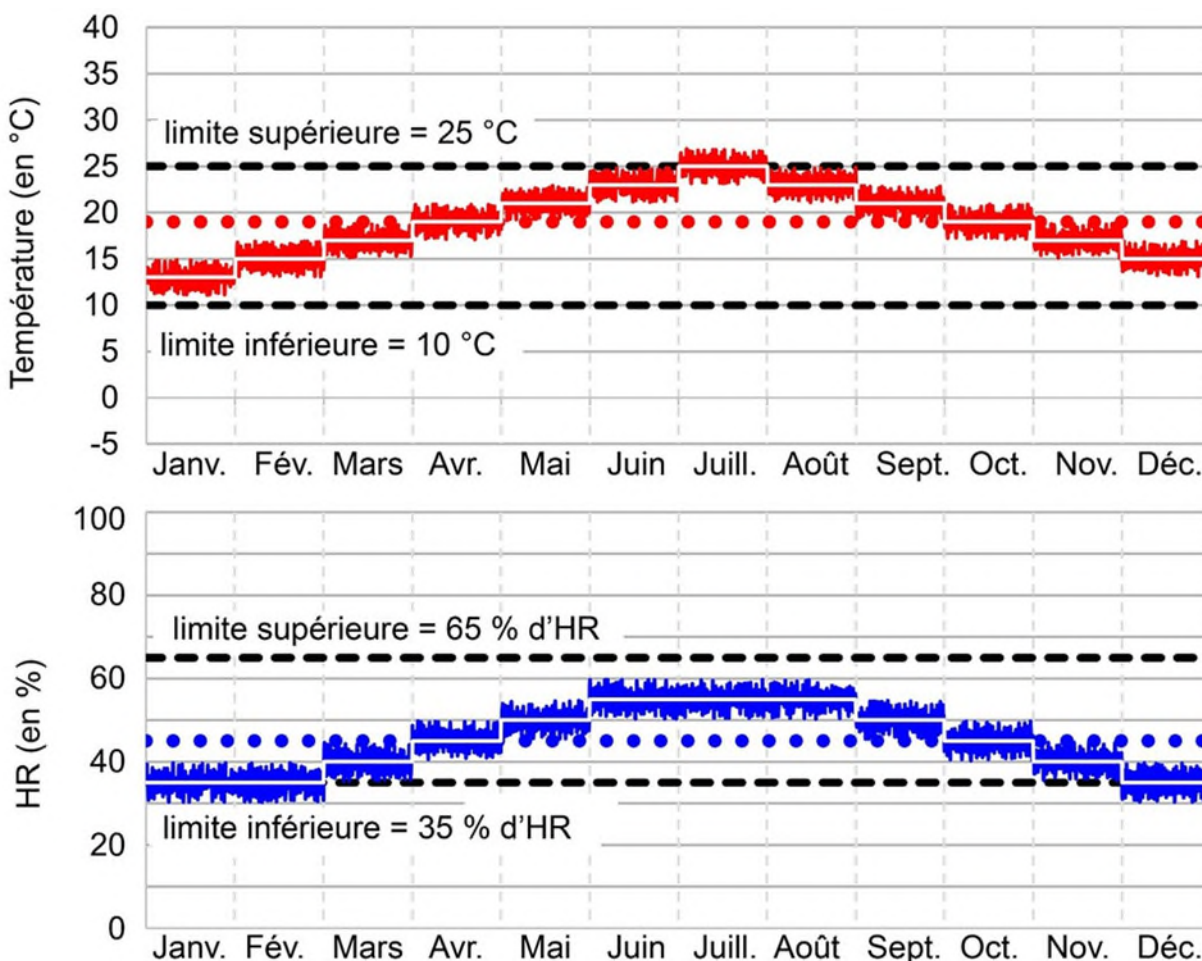
La figure 4 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale qui monte et descend graduellement de mois en mois, et à laquelle sont surimposées des variations brèves. Deux lignes horizontales pointillées indiquent les limites supérieure et inférieure. Le graphique d'HR montre un groupe de courbes semblable et un changement graduel semblable de mois en mois.

In Figure 4, the annual baseline for RH is set at 45% RH (blue dotted line). The settings (white line) change smoothly during the months of temperature adjustment (March, June, September and December). The summer plateau is set at 55% RH, and the winter plateau is set at 35% RH. With symmetrical seasonal adjustments, the actual annual average RH is the same as the annual baseline: 45% RH. Note that the long-term outer limit of winter, 35% RH, applies to the RH setting (white line) and not to the lowest trough of the short-term fluctuations (blue spikes).

Exemple 2

Sur la figure 5, la valeur de référence annuelle pour la température est de 19 °C (ligne rouge pointillée). Le paramètre de température du système de CVC (ligne blanche) ne peut être modifié qu'une fois par mois; c'est donc fait au début de chaque mois. La fourchette totale de température possible, en limitant les ajustements à deux degrés par mois sur six mois, n'est que de 12 °C; la température va donc de 25 °C en juillet à 13 °C en janvier. Comme les changements sont symétriques, la moyenne annuelle réelle est aussi de 19 °C. Il est à noter que la limite supérieure à long terme de température, soit 25 °C, s'applique à la température de réglage (ligne blanche), et non aux pics des variations brèves qui dépassent la limite.

Un tel ajustement des températures n'est pas très écoénergétique si les conditions climatiques locales varient davantage. L'avantage de procéder à un ajustement plus important de la température sur un mois, comme illustré à la figure 4, est que cela permet de suivre de plus près un climat marqué par des changements rapides des températures entre les conditions hivernales et estivales (ou des changements brusques dans l'occupation et l'accès selon les saisons).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0008

Figure 5. Exemple de graphiques montrant la température et l'HR sur une année complète dans un bâtiment où le personnel a choisi les ajustements saisonniers maximaux et les variations brèves maximales que permet le type de contrôle A1 de l'ASHRAE, tout en faisant de nombreux ajustements de température et d'HR brusques mais minimes.

Description de la figure 5

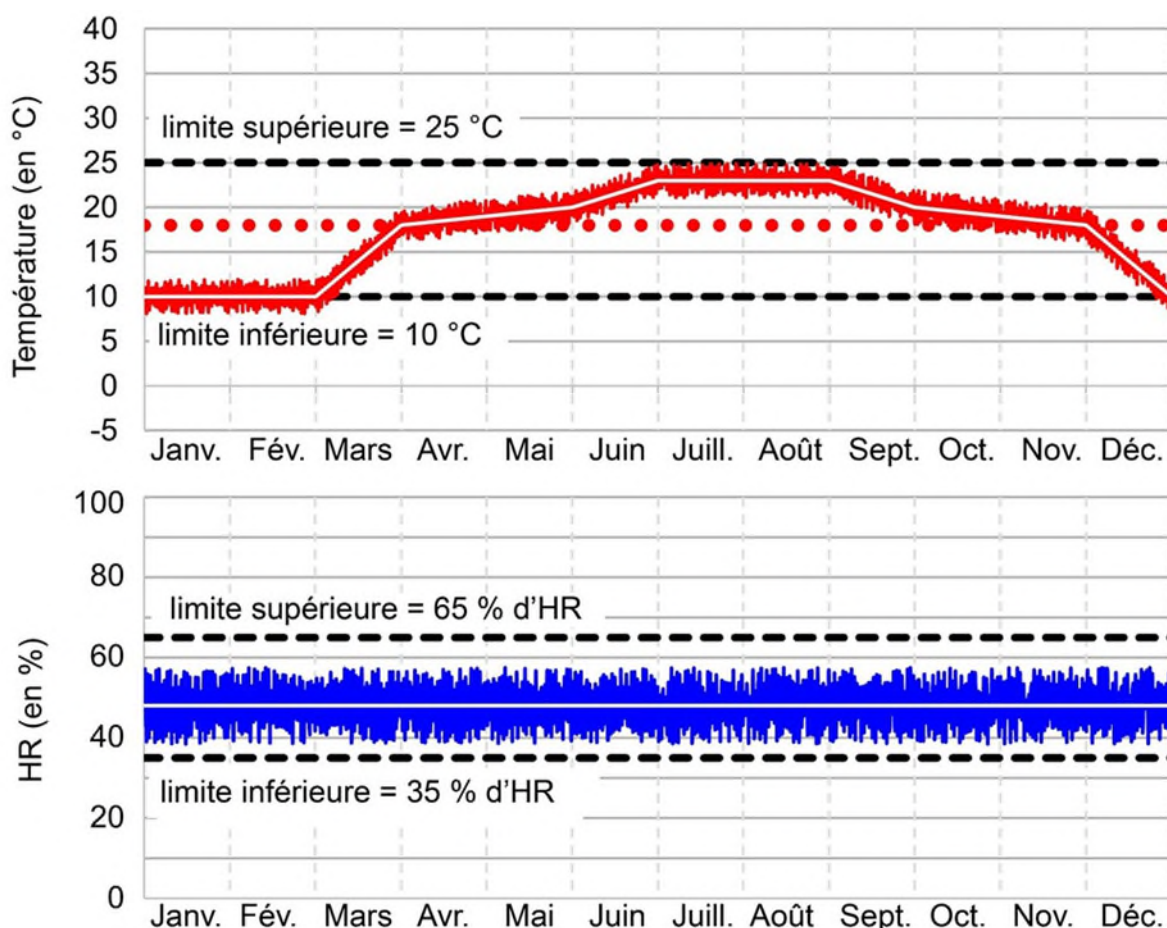
La figure 5 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale qui monte et descend par étape, de mois en mois, et à laquelle sont surimposées de nombreuses variations brèves. Deux lignes horizontales pointillées représentent les limites supérieure et inférieure. Le graphique d'HR montre un groupe de courbes semblable, et la courbe principale monte et descend par étape, de mois en mois.

In Figure 5, the annual baseline for RH is set at 45% RH (blue dotted line). The setting (white line) is changed monthly by 5% RH, which is within the permissible short-term fluctuations of $\pm 5\%$ RH. The seasonal adjustments are the maximum permissible (an increase or decrease by 10% RH): summer RH is set at 55%, and winter RH is set at 35%.

Exemples de tracé de thermohygrographe pour la spécification A2 de l'ASHRAE

Exemple 1

Les ajustements saisonniers de la température de la figure 6 sont les mêmes que ceux de la figure 5, sauf que la valeur de référence annuelle (ligne rouge pointillée) est de deux degrés de moins, soit 18 °C. Les ajustements saisonniers suivent les paramètres typiquement utilisés dans une réserve : réglage hivernal de 10 °C en janvier et en février et réglage estival de 23 °C en juillet et en août. La température, au printemps, est réglée à 20 °C, puis est ajustée graduellement jusqu'au maximum estival de 23 °C, avant de diminuer de nouveau. Le système est pleinement programmable, de sorte que l'on peut ajuster la température (ligne blanche) par étape, par exemple deux fois par semaine. Les plus fortes transitions, soit une hausse de 8 °C en mars et une baisse de 8 °C en décembre, respectent tout juste les suggestions de l'ICC selon lesquelles les ajustements saisonniers ne doivent pas dépasser un taux de 2 °C par semaine. La moyenne annuelle réelle résultant de ces paramètres est de 17,8 °C. Il est à noter que la température limite inférieure à long terme, soit 10 °C, s'applique à la température de réglage (ligne blanche), et non aux pics des variations brève qui dépassent la limite de 10 °C.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0010

Figure 6. Exemple de graphiques montrant la température et l'HR sur une année complète dans un bâtiment où le personnel a choisi les ajustements saisonniers maximaux et les variations brèves maximales que permet le type de contrôle A2 de l'ASHRAE.

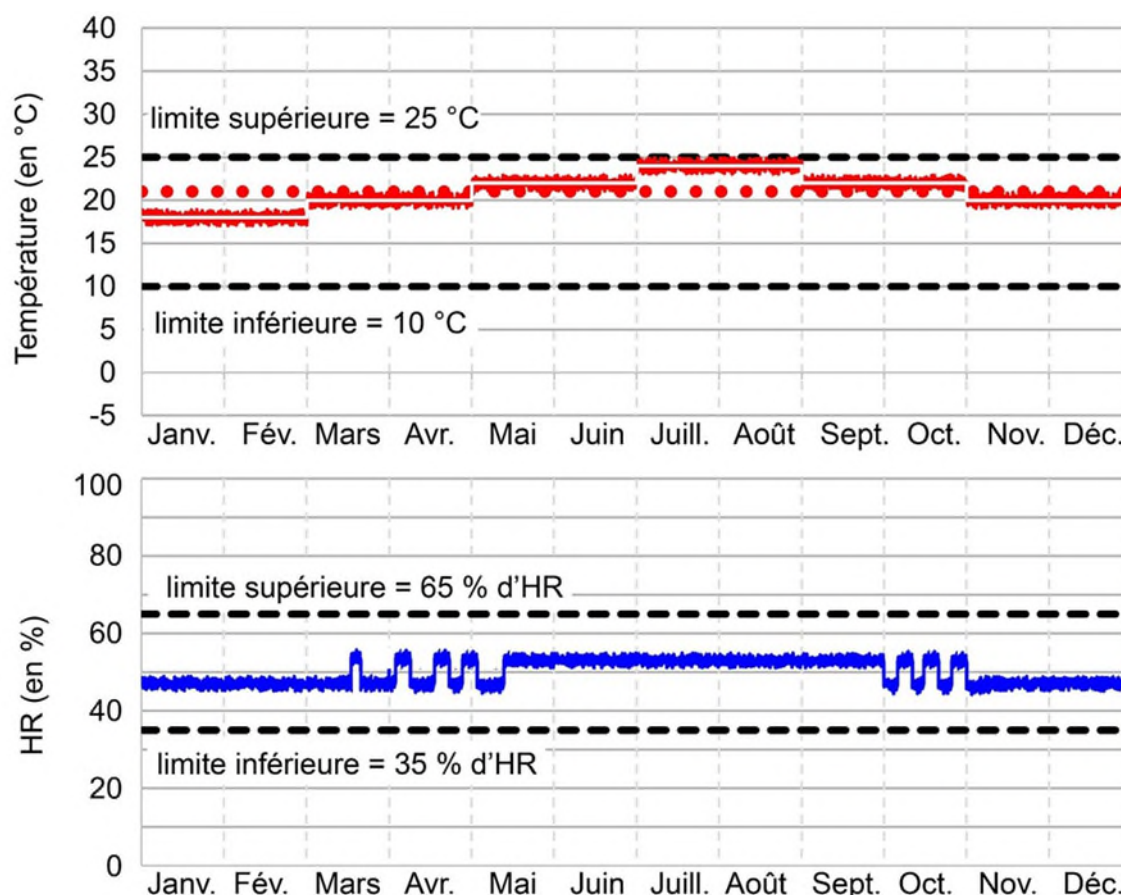
Description de la figure 6

La figure 6 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale qui monte et descend graduellement de mois en mois, et à laquelle sont surimposées de nombreuses variations brèves. Deux lignes horizontales pointillées représentent les limites supérieure et inférieure. Le graphique d'HR montre un groupe de courbes semblables, mais la courbe principale est horizontale et les variations brèves qui y sont surimposées sont plus marquées que sur les figures précédentes.

Sur la figure 6, la valeur de référence annuelle pour l'HR est établie à 48 % (ligne blanche horizontale).

Exemple 2

La figure 7 illustre la situation d'un bâtiment dans lequel les ajustements saisonniers de la température se font selon les paramètres types des aires d'exposition avec une valeur de référence annuelle de 21 °C (ligne rouge pointillée). La température maximale estivale est de 24 °C en juillet et en août, et en hiver, cette valeur tombe à 18 °C en janvier et en février. Les ajustements saisonniers sont faits mensuellement par étape, en respectant les variations brèves permises de ± 2 °C. En fait, ils n'atteignent que la moitié des variations maximales permises. La moyenne annuelle réelle résultant de ces ajustements symétriques est la même que la moyenne nominale, soit 21 °C.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0012

Figure 7. Exemple de graphiques montrant la température et l'HR sur une année complète dans un bâtiment où le système de CVC comporte une plage d'inactivité, mais continue de respecter les variations brèves maximales que permet le type de contrôle A2 de l'ASHRAE.

Description de la figure 7

La figure 7 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale qui monte et descend par étape, de mois en mois, et à laquelle sont surimposées de nombreuses variations brèves. Deux lignes horizontales pointillées représentent les limites supérieure et inférieure. Le graphique d'HR montre un groupe de courbes semblable, mais les changements à la courbe principale sont plus erratiques au printemps et à l'automne.

La figure 7 illustre une situation dans laquelle l'HR est réglée selon une valeur de référence annuelle de 50 % (pour plus de clarté, la ligne bleue pointillée n'est pas illustrée). Les systèmes d'humidification et de déshumidification sont capables d'offrir un contrôle de l'HR de ± 2 %; on utilise donc la fourchette permise de variations brèves de ± 10 % d'HR pour permettre une plage d'inactivité de 6 % d'HR entre l'utilisation du système d'humidification ($47 \% \pm 2 \%$ d'HR) et du système de déshumidification ($53 \% \pm 2 \%$ d'HR). L'HR doit donc varier de 8 % (par exemple, passer de 47 % à 55 %) avant que le système opposé soit déclenché. Ce n'est qu'au printemps et à l'automne que l'on passe fréquemment d'un système à l'autre. Pour plus de clarté, la courbe d'HR de la figure 7 a été simplifiée pour les saisons de transition. On peut s'attendre à passer parfois de l'humidification à la déshumidification plus d'une fois par semaine, comme illustré sur la figure, mais cette fréquence restera bien moindre qu'elle le serait si aucune plage d'inactivité n'était prévue.

Spécification B de l'ASHRAE

Définition de la spécification B de l'ASHRAE

Types de collections et de bâtiments : musées, archives et bibliothèques devant réduire les contraintes causées au bâtiment (par exemple, musées dans des bâtiments historiques) en fonction de leur zone climatique

Type de contrôle : contrôle limité avec variations saisonnières de l'HR et vastes variations saisonnières de la température

Tableau 5 : Les quatre paramètres de la spécification B de l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
30 °C ou moins	Pour les collections permanentes : moyenne annuelle historique de température	- Hausse de 10 °C - Baisse de 20 °C	±5 °C
HR de 30 % à 70 %	Pour les collections permanentes : moyenne annuelle historique d'HR	- Hausse de 10 % - Baisse de 10 %	±10 % d'RH

Avantages et risques pour les collections de la spécification B de l'ASHRAE

Les avantages pour la collection incluent la prévention de la germination et de la croissance de moisissures, de même que la prévention d'une corrosion rapide. De plus, la détérioration chimique ralentit en période hivernale froide (à condition de maintenir l'HR à des taux modérés). Beaucoup d'objets et la plupart des livres ne courent aucun risque de subir des dommages mécaniques. Cependant, il existe un risque faible pour la plupart des peintures et des photos, et pour certains objets et livres. Un risque modéré menace les objets ayant une sensibilité élevée. Les objets comportant de la peinture ou du plastique souple qui peut devenir friable au froid, comme les peintures sur toiles, doivent être manipulés avec un soin particulier par temps froid. À 20 °C, les objets chimiquement instables se détériorent passablement en quelques décennies. Chaque hausse de la température de 5 °C double la vitesse de détérioration. Pour en savoir plus sur les avantages et risques précis de différentes conditions de température et d'HR pour des objets donnés, consulter ClimaSpec.

Commentaires sur la spécification B de l'ASHRAE

Les variations brèves permises n'ont pas changé dans l'édition de 2019 par rapport aux éditions précédentes, et les ajustements saisonniers pour l'été sont aussi restés les mêmes. Toutefois, l'édition de 2019 introduit des limites supérieure et inférieure à long terme (quoique les éditions de 1999 à 2015 précisaient déjà une limite supérieure de température de 30 °C) et met davantage l'accent sur les moyennes annuelles historiques comme valeur de référence annuelle appropriée, plutôt qu'un réglage par défaut de 50 % d'HR et de 15 °C à 25 °C.

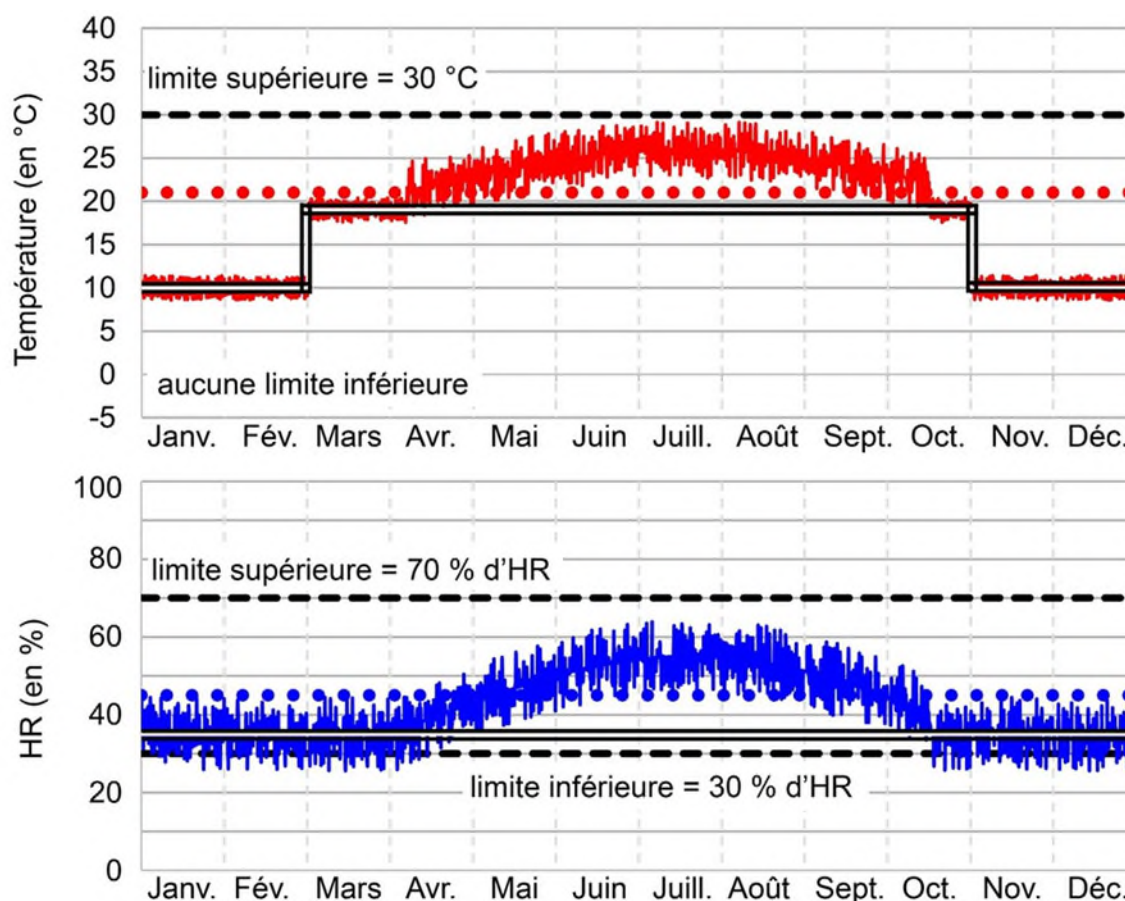
Les risques mécaniques mentionnés sous la rubrique « Avantages et risques pour les collections de la spécification B de l'ASHRAE » s'appliquent uniquement aux objets qui n'ont jamais été exposés à

des variations depuis leur fabrication ou leur réparation. Un objet qui a été exposé à une importante variation se sera fissuré au maximum en un seul cycle de variation de la même ampleur. Pour en savoir plus, consulter [Aperçu des lignes directrices sur le climat – Annexe B : Sensibilité aux variations et application des variations démontrées](#).

Le type de contrôle B diffère du type A1 du fait, principalement, de la fourchette plus vaste des températures inférieures permises. Les ajustements saisonniers de l'HR ne sont pas plus marqués que dans la spécification A1, mais les variations brèves sont deux fois plus grandes ($\pm 10\%$ plutôt que $\pm 5\%$). Dans les régions les plus chaudes du Canada, c'est-à-dire les zones 4 et 5 (figure 1), le contrôle B de l'ASHRAE est un objectif raisonnable pour les collections dans les bâtiments historiques qui peuvent tolérer l'intervention de systèmes de régulation du climat. Toutefois, il faut veiller à ce que ces systèmes n'endommagent pas le bâtiment, que ce soit à cause de la condensation due à une humidité excessive pendant les hivers froids ou d'une climatisation excessive pendant les étés humides. Dans les régions plus froides du Canada, on peut appliquer le contrôle B de l'ASHRAE dans les bâtiments historiques si l'on renonce aux températures de confort humain et si l'on tire pleinement parti du recul de l'hiver, ou encore si le chauffage est contrôlé par un humidostat. Si certaines parties de la collection demeurent menacées par la fourchette d'HR que permet la spécification B de l'ASHRAE, on peut atténuer ces risques au moyen de contenants dans lesquels on trouve un microclimat, par exemple des vitrines, des armoires ou des emballages de mise en réserve hermétiques.

Exemple de tracé de thermohygrographe pour la spécification B de l'ASHRAE

La figure 8 illustre la situation d'un bâtiment disposant uniquement d'un système de chauffage, et n'ayant donc aucun système de climatisation. Étant donné que la température historique connue, en été, approche $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ en après-midi, la valeur de référence annuelle de la température a été réglée à $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ligne rouge pointillée). Par souci d'économie d'énergie, le thermostat (ligne blanche entre deux lignes noires) est réglé manuellement à $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque le musée est fermé, soit du 1^{er} novembre au 1^{er} mars. Il est réglé à $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque le musée est ouvert. Parfois, en avril, la température se met à grimper, et les seules mesures dont dispose le musée pour limiter cette hausse sont la ventilation naturelle, des volets pouvant être fermés et des arbres qui jettent de l'ombre. Étant donné la baisse marquée de la température en hiver, la moyenne annuelle réelle, sur la figure 8, est d'environ $19\text{ }^{\circ}\text{C}$.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0014

Figure 8. Exemple de graphiques montrant la température et l'HR sur une année complète dans un bâtiment où le personnel a choisi les ajustements saisonniers maximaux et les variations brèves maximales que permet le type de contrôle B de l'ASHRAE.

Description de la figure 8

La figure 8 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale illustrant une température fraîche stable en hiver, suivie d'un bond soudain de plusieurs degrés au printemps, puis d'une hausse jusqu'à un pic en été, après quoi il y a une diminution jusqu'à l'automne, suivie d'une chute brusque jusqu'à la température hivernale stable. De nombreuses variations brèves sont surimposées à la courbe tout au long de l'année. Il y a une ligne horizontale pointillée qui représente la limite supérieure, mais aucune limite inférieure. Le graphique d'HR montre un groupe de courbes semblable et un changement graduel semblable en été. Les variations brèves surimposées sont plus importantes que celles des figures précédentes. Deux lignes horizontales pointillées représentent les limites supérieure et inférieure.

La figure 8, illustre une situation dans laquelle un bâtiment dispose d'un système d'humidification, mais n'a pas de système de déshumidification. L'HR est établie selon une valeur de référence annuelle de 45 % (ligne bleue pointillée), puisque cela permet des ajustements saisonniers en été (hausse de 10 % de l'HR), étant donné la moyenne mensuelle connue en juillet et en août (55 %). Le système d'humidification doit donc être réglé à au moins 35 % d'HR en hiver (ligne blanche entre deux lignes noires). La température étant réglée à 10 °C en hiver, le risque est faible que de la condensation se forme sur les murs lors d'une HR de 35 % $\pm$ 10 %. La moyenne annuelle réelle, sur la figure 8, est d'environ 19 °C.

Spécification C de l'ASHRAE

Définition de la spécification C de l'ASHRAE

Types de collections et de bâtiments : musées, archives et bibliothèques devant réduire les contraintes causées au bâtiment (par exemple, musées dans des bâtiments historiques) en fonction de leur zone climatique

Type de contrôle : prévention des extrêmes en matière d'HR (humidité excessive ou dessèchement) ainsi que des températures extrêmement hautes

Tableau 6 : Les quatre paramètres de la spécification C de l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
40 °C ou moins	Température généralement au-dessous de 25 °C	Température non précisée	La température dépasse rarement 30 °C
HR de 25 % à 75 %	Entre 25 % et 75 % à l'année	HR non précisée	Ne dépasse jamais une HR de 65 % pendant plus de X jours ¹

¹ Le manuel de l'ASHRAE présente au lecteur un graphique sur la croissance des moisissures (ASHRAE, 2023, figure 3); il vise à établir le nombre de jours où l'HR doit se situer entre 65 % et 75 % avant qu'apparaissent des moisissures visibles. Ce graphique présente la même information que la courbe rouge du graphique illustré sur la page Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie. Les résultats de ce graphique, c'est-à-dire le temps nécessaire à l'apparition de mycéliums visibles, sont fournis par le Calculateur de moisissures dans ClimaSpec.

Avantages et risques pour les collections de la spécification C de l'ASHRAE

Les avantages pour la collection incluent la prévention de la germination et de la croissance de moisissures, de même que la prévention d'une corrosion rapide. De plus, la détérioration chimique ralentit en période hivernale froide (à condition de maintenir l'HR à des taux modérés). De nombreux objets et la plupart des livres courent un risque faible de subir des dommages mécaniques, et ce risque est modéré pour la plupart des peintures et des photos, ainsi que pour certains objets et livres. Il existe un risque important pour les objets ayant une [vulnérabilité](#) élevée. Il convient d'être encore plus prudent qu'avec la spécification B de l'ASHRAE au moment de manipuler des objets comportant de la peinture ou du plastique souple qui devient friable au froid, par exemple des peintures sur toile. À 20 °C, les objets chimiquement instables se détériorent passablement en quelques décennies. Chaque hausse de la température de 5 °C double la vitesse de détérioration.

Les risques mécaniques mentionnés à la section « Avantages et risques pour la collection de la spécification C de l'ASHRAE » s'appliquent uniquement aux objets qui n'ont jamais été exposés à des variations depuis leur fabrication ou leur réparation. Un objet qui a été exposé à une importante variation se sera fissuré au maximum selon l'ampleur de cette variation. Les variations subséquentes devront être aussi ou plus élevées que la précédente ([variation démontrée](#)) pour causer de nouvelles fissures.

Pour en savoir plus, consulter [Aperçu des lignes directrices sur le climat – Annexe B : Sensibilité aux variations et application des variations démontrées](#). Pour obtenir plus d'information sur les avantages et risques précis de différentes conditions de température et d'HR pour des objets donnés, consulter ClimaSpec.

Commentaires sur la spécification C de l'ASHRAE

Pour l'essentiel, la définition de la spécification C, dans les éditions de 1999 à 2015 du manuel de l'ASHRAE, consistait en une HR située entre 25 % et 75 % à l'année. Dans l'édition de 2019 et celle de 2023, cette fourchette demeure au cœur de la définition, mais on y précise aussi les limites d'HR. Les lignes directrices en matière de température demeurent à peu près les mêmes en 2019 et en 2023 qu'en 1999, soit ne dépasser que rarement 30 °C et rester habituellement sous 25 °C. Toutefois, une limite supérieure de 40 °C a été ajoutée. On souhaitait ainsi reconnaître le fait que si la détérioration chimique s'accélère de beaucoup lorsque le mercure passe de 25 °C à 30 °C, puis à 40 °C, la détérioration que peut causer une brève exposition à une température élevée (la limite supérieure) est physique. Dans ce cas, il s'agit du ramollissement de bien des cires et adhésifs au-dessus de 40 °C (consulter le tableau 2 sur la page [Agent de détérioration : température inadéquate](#)).

Les variations brèves de température et d'HR n'étaient pas mentionnées dans les éditions de 1999 et de 2015, mais dans l'édition de 2019 et celle de 2023, on définit les variations brèves d'HR comme ne

dépassant pas 65 % pendant plus de X jours. Le lecteur est dirigé vers un graphique permettant d'estimer X , c'est-à-dire le temps requis pour que des moisissures apparaissent lorsque l'HR se situe entre 65 % et 75 %. On souhaitait ainsi reconnaître que si la croissance de moisissures s'accélère de beaucoup lorsque l'HR dépasse 75 %, il existe tout de même un risque moins élevé de croissance lente de moisissures lorsque l'HR se situe entre 65 % et 75 %. La page Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie contient un graphique montrant le temps d'apparition des moisissures, et le Calculateur de moisissures de ClimaSpec donne une estimation du temps d'apparition à différentes valeurs d'humidité relative.

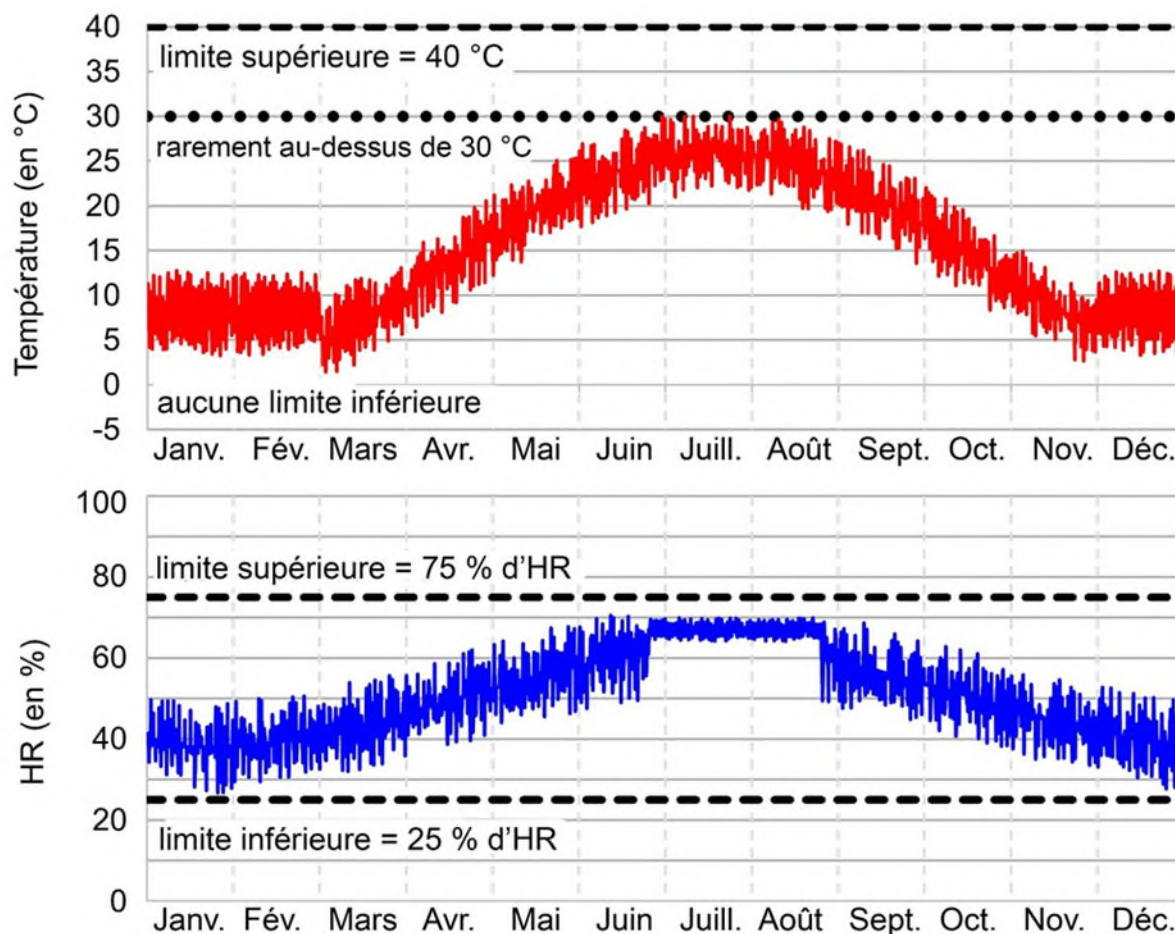
Comme pour tous les types de contrôle précédents, l'édition de 2019 et celle de 2023 mettent là encore un accent plus marqué sur les moyennes annuelles historiques en tant que paramètre approprié, plutôt qu'un paramètre par défaut de 50 % d'HR et de 15 °C à 25 °C. Au-dessous de 25 % et au-dessus de 75 % d'HR, la réaction hygroscopique à chaque changement de l'HR peut être deux ou trois fois plus forte que ce que l'on peut constater à l'intérieur de cette fourchette. Les matériaux hygroscopiques qui subissent des contraintes sont plus friables au-dessous de 25 % d'HR. De nombreux types de meubles et d'armoires ont été conçus pour tolérer une HR assez faible, mais pas le dessèchement qui se produit au-dessous de 25 %. À l'autre extrême, les moisissures et la corrosion augmentent rapidement au-dessus de 75 % d'HR.

On doit donc reconnaître que la spécification C de l'ASHRAE offre la majorité des avantages d'un contrôle du climat pour une fraction des coûts liés à des types de contrôle plus étroits. Cela en fait une cible raisonnable pour les bâtiments historiques dotés de systèmes de CVC de base parce que leurs collections ont déjà subi les effets de variations démontrées de l'HR et que le bâtiment serait endommagé par la condensation liée à une humidité excessive lors d'hivers froids. Si des éléments de la collection demeurent menacés par les conditions, par exemple de nouveaux objets qui étaient conservés dans de meilleures conditions avant leur acquisition, effectuer un contrôle du climat de ces objets en ayant recours à des contenants dans lesquels on trouve un microclimat (par exemple, des vitrines hermétiques dans des espaces d'exposition ou des armoires et des emballages dans des réserves).

Exemple de tracé de thermohygrographe pour la spécification C de l'ASHRAE

La figure 9 illustre le comportement d'un bâtiment dans lequel le chauffage hivernal est contrôlé par un humidostat (Lafontaine et Michalski, 1984) pour empêcher l'HR de baisser sous la barre des 25 %. On garde ainsi le bâtiment dans les limites des lignes directrices pour la spécification C de l'ASHRAE. Dans ce climat donné, on obtient une température hivernale se situant autour de 4 °C, avec des pics de température assez marqués lorsque le système tente de stabiliser l'HR dans diverses conditions météorologiques. En été, le climat local et le comportement du bâtiment, jumelés à une ventilation naturelle, permettent d'obtenir des conditions en deçà des limites de température supérieures pour la

spécification C de l'ASHRAE. (Dans cette situation, il n'y a aucune valeur de référence annuelle et aucun ajustement saisonnier; il s'agit simplement de la fourchette réelle et de la moyenne annuelle réelle, soit environ 15 °C.) Cela correspond à un bâtiment historique type, chauffé par une certaine exposition au soleil et bénéficiant d'une inertie thermique aplanissant un peu les changements de température hebdomadaires lorsque le climat local varie beaucoup.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0016

Figure 9. Exemple de graphiques montrant les températures et l'HR sur une année complète dans un bâtiment respectant le type de contrôle C de l'ASHRAE.

Description de la figure 9

La figure 9 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale passant graduellement d'un minimum hivernal à un maximum estival, et à laquelle sont surimposées de nombreuses variations brèves. Deux lignes

horizontales pointillées représentent les limites supérieure et inférieure. Le graphique d'HR montre un groupe semblable de courbes et une courbe principale ayant sensiblement la même forme qui oscille autour de 40 % en hiver et de 70 % en été. Les oscillations sont beaucoup moins fortes en juillet et en août que pendant les autres mois de l'année.

La courbe d'HR de la figure 9 montre que l'HR ne dépasse pas 70 % en été, grâce à l'installation d'un déshumidificateur. Le paramètre de 70 % d'HR est une estimation de l'HR la plus faible à laquelle des moisissures pourraient apparaître si elle était maintenue pendant trois mois.

À certains moments, la direction de l'établissement a songé à chauffer les locaux en hiver, mais cela aurait fait baisser l'HR bien au-dessous de la limite inférieure de 25 % (comme c'est le cas avec le type de contrôle D de l'ASHRAE). La décision réfléchie de ne pas chauffer les locaux était une intervention active visant à respecter la spécification C plutôt que la spécification D. (Dans cette situation, il n'y a aucune valeur de référence et aucun ajustement saisonnier; il n'y a que la fourchette réelle et la moyenne annuelle réelle, soit 51 % d'HR.)

Spécification D de l'ASHRAE

Définition de la spécification D de l'ASHRAE

Types de collections et de bâtiments : collections conservées dans des bâtiments ouverts et des bâtiments historiques

Type de contrôle : prévention de l'HR très élevée (humidité excessive)

Tableau 7 : Les quatre paramètres de la spécification D de l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
Température non précisée	Température non précisée	Température non précisée	Température non précisée
75 % d'HR ou moins	HR maintenue avec constance au-dessous de 75 %	HR non précisée	Ne dépasse jamais une HR de 65 % pendant plus de X jours ¹

¹ Le chapitre de l'ASHRAE présente au lecteur un graphique sur la croissance des moisissures (ASHRAE, 2023, figure 3); il vise à établir le nombre de jours où l'HR doit se situer entre 65 % et 75 %

avant qu'apparaissent des moisissures visibles. Ce graphique présente la même information que la double courbe rouge de la figure 1 sur la page Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie. Les résultats de ce graphique, c'est-à-dire le temps nécessaire à l'apparition de mycéliums visibles, sont fournis par le Calculateur de moisissures dans ClimaSpec.

Avantages et risques pour les collections de la spécification D de l'ASHRAE

À 20 °C, les objets chimiquement instables se détériorent passablement en quelques décennies. Chaque hausse de la température de 5 °C double la vitesse de détérioration. À l'opposé, une saison hivernale froide peut prolonger la [durée de vie](#) de tels objets. Les avantages de la spécification D de l'ASHRAE incluent la prévention de la germination et de la croissance de moisissures, de même que la prévention d'une corrosion rapide. La plupart des objets et des peintures courent un risque élevé de subir des dommages mécaniques soudains ou cumulatifs en raison de fissures causées par une faible humidité, mais ce type de contrôle permet d'éviter la délamination et les déformations causées par une humidité élevée, en particulier aux placages, aux peintures, aux papiers et aux photos. Pour en savoir plus sur les avantages et risques précis de différentes conditions de température et d'HR pour des objets donnés, consulter ClimaSpec.

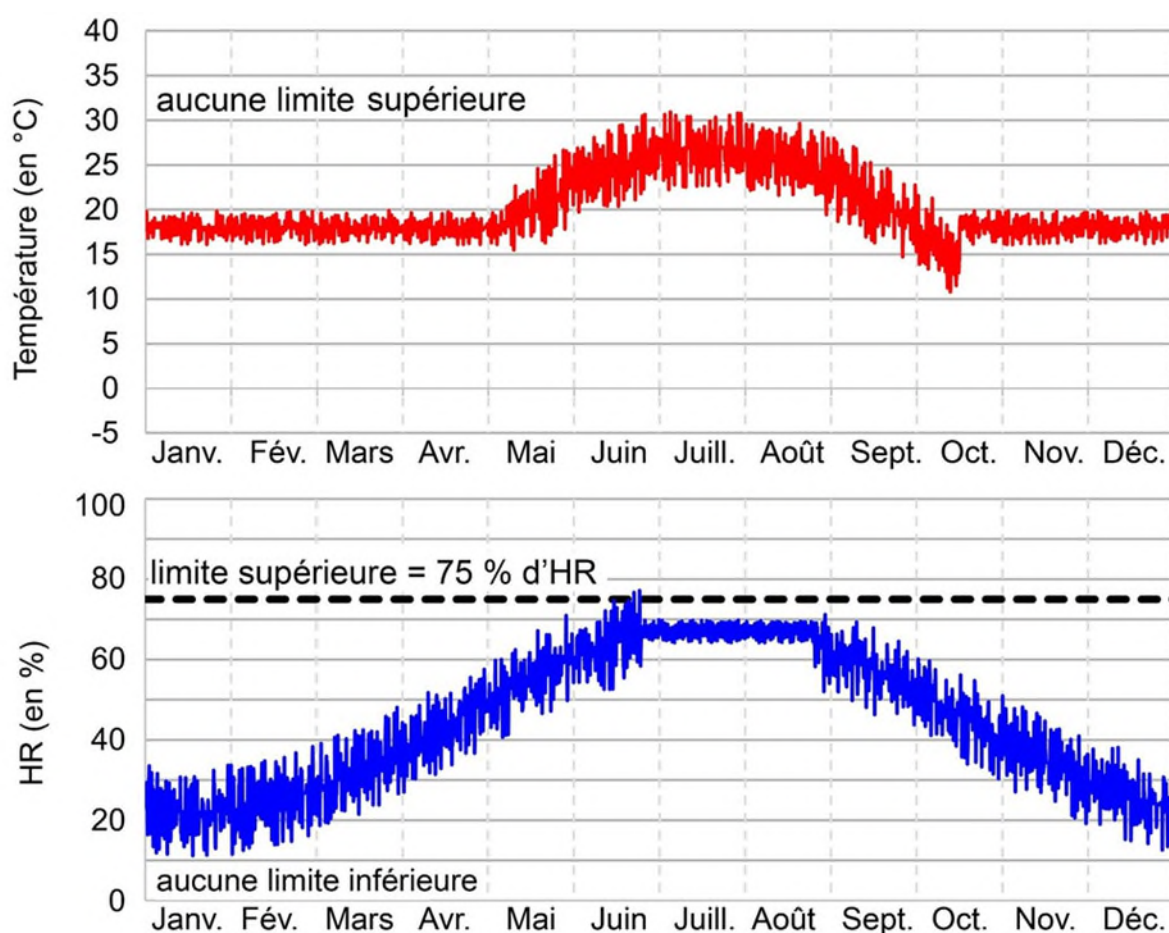
Commentaires sur la spécification D de l'ASHRAE

Pour l'essentiel, la définition de la spécification D consiste simplement à conserver l'HR au-dessous de 75 %. Cette donnée constitue également la limite supérieure (à ne pas dépasser). Les variations brèves n'étaient pas précisées dans les éditions précédentes pour la spécification D de l'ASHRAE, et elles ne le sont toujours pas dans l'édition de 2019 et celle de 2023. Aucune ligne directrice sur la température n'était fournie non plus dans les éditions précédentes, comme dans celle de 2019.

L'humidité excessive (HR supérieure à 75 %) causent les processus de détérioration suivants : croissance rapide de moisissures, corrosion rapide, délamination et soulèvement en tente des peintures sur toiles, détachement des placages collés et adhérence de la couche d'image des documents photographiques à tout ce qui entre en contact avec eux. Le but le plus utile de tout système de contrôle du climat consiste donc à éviter avec constance l'humidité excessive. Bien qu'une cible aussi simple ne soit normalement pas considérée comme une condition technique projetée, elle devient un objectif légitime pour tout bâtiment, historique ou non, dont l'enveloppe est de mauvaise qualité. Il s'agit également d'une cible légitime pour les systèmes mécaniques intelligents, mais de conception inusitée, dans des bâtiments simples situés dans des zones climatiques humides ou marines. Bien sûr, l'humidité excessive est souvent causée par des fuites d'eau ou l'infiltration d'eau souterraine, et il convient de régler ces problèmes à la source avant de recourir à une solution comprenant un système de CVC.

Exemple de tracé de thermohygrographe pour la spécification D de l'ASHRAE

In Figure 10, the building only has winter heating and no summer cooling. The heating is set for 18°C, and the system maintains it within $\pm 2^\circ\text{C}$. Heating is switched off at the end of May and switched back on mid-October (not earlier, even if occupants complain). Since ASHRAE D has no temperature specifications, these variations are all within the guideline. (There is no annual baseline in this situation, nor any seasonal adjustments; there is simply the actual range and actual annual average, which is about 20°C.)



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0018

Figure 10. Exemple d'un graphique montrant les températures et l'HR sur une année complète dans un bâtiment respectant le type de contrôle D de l'ASHRAE.

Description de la figure 10:

La figure 10 contient deux graphiques superposés. Celui du haut montre la température, et celui du bas, l'HR. L'axe horizontal représente le temps, soit les 12 mois de l'année. Le graphique de température montre une courbe principale qui passe graduellement d'un minimum hivernal à un maximum estival, et à laquelle sont superposées de nombreuses variations brèves. Le graphique d'HR montre un groupe semblable de courbes et une courbe principale ayant sensiblement la même forme, qui oscille autour de 20 % en hiver et de 70 % en été. Les oscillations sont beaucoup moins fortes en juillet et en août que pendant les autres mois de l'année.

La courbe d'HR de la figure 10 montre que l'HR n'a pas dépassé 70 % en été. Cela est dû à l'utilisation d'un déshumidificateur pendant deux à trois mois de l'année (seule mesure active prise dans un établissement autrement non contrôlé afin de respecter le type de contrôle D de l'ASHRAE). (Dans cette situation, il n'y a aucune valeur de référence annuelle et aucun ajustement saisonnier; il n'y a que la fourchette réelle et la moyenne annuelle réelle, soit 43 % d'HR.) La limite d'HR de 70 % est basée sur une estimation de l'HR la plus basse qui, si elle est dépassée pendant trois mois, causerait l'apparition de moisissures.

Espace d'exposition temporaire et espace de déballage des objets prêtés

Définition d'un espace d'exposition temporaire et d'un espace de déballage des objets prêtés

Types de collections et de bâtiments : espace d'exposition temporaire et espace de déballage des objets prêtés

Type de contrôle : conditions précisées dans les ententes de prêt

Actuellement, les lignes directrices les plus souvent utilisées pour les prêts sont celles qu'ont adoptées de nombreux musées et établissements de conservation et que l'on appelle communément « les lignes directrices du Groupe Bizot ». Pour obtenir un historique sommaire des lignes directrices du Groupe Bizot et des organismes qui les ont adoptées, consulter Michalski (2016); la liste inclut le Comité pour la conservation du Conseil international des musées (ICOM-CC), l'Institut international pour la conservation des objets d'art et d'histoire (IIC), l'Association of Art Museum Directors (AAMD) et le British Museum. Les lignes directrices du Groupe Bizot sont définies principalement en termes de limites supérieure et inférieure pour la durée du prêt. Ces limites sont précisées dans le tableau 8.

Les lignes directrices du Groupe Bizot précisent également que :

- le conservateur de l'établissement prêteur porte un jugement sur les objets qui peuvent être déplacés dans ces conditions en toute sécurité;
- des contenants dans lesquels on trouve un microclimat (appelé « microenvironnement » dans les lignes directrices) seront utilisés, au besoin, pour stabiliser davantage l'HR.

Tableau 8 : Éléments des lignes directrices sur les prêts du Groupe Bizot

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
De 16 °C à 25 °C	Température non précisée	Température non précisée	Température non précisée
HR de 40 % à 60 %	HR non précisée	HR non précisée	Maximum ± 10 % HR en 24 heures

Avantages et risques pour les collections de l'utilisation d'un espace d'exposition temporaire et d'un espace de déballage des objets prêtés

Le prêteur évalue les avantages et les risques pour ses objets et établit les clauses du contrat en fonction des résultats de cette évaluation, qui se fait souvent selon un principe de prudence et d'aversion au risque.

Les établissements ayant adopté les lignes directrices du Groupe Bizot n'ont pas établi d'avantages et de risques attendus. Cependant, comme ces lignes directrices suivent les mêmes types de contrôle que la spécification A2 de l'ASHRAE (HR moyenne réglée à 50 %), on peut supposer, sans exagération, que les avantages et les risques pour un prêt de quelques mois seront les mêmes que ceux établis dans la spécification A2 (les avantages seront même un peu plus importants). Pour en savoir plus sur les avantages et risques précis de différentes conditions de température et d'HR pour des objets donnés, consulter ClimaSpec.

Commentaires sur l'utilisation d'un espace d'exposition temporaire et d'un espace de déballage des objets prêtés

Toutes les ententes de prêt ne se font pas conformément aux lignes directrices du Groupe Bizot. Certains établissements ajoutent des clauses supplémentaires sur les variations brèves, qui sont souvent les mêmes que celles mentionnées dans la spécification AA de l'ASHRAE. Certains prêteurs

demandent simplement le respect de la spécification AA avec une moyenne fixée à 50 % pour l'HR et à 21 °C pour la température (lignes directrices traditionnelles très étroites).

Mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation

Définition de la mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation

Types de collections et de bâtiments : matériaux organiques chimiquement instables conservés dans des bâtiments ou des salles modernes spécialisés

Types de contrôle : frais, froid et sous le point de congélation

Le chapitre de l'ASHRAE traite de trois types de contrôle à basse température. Il s'agit d'une adaptation des deux principales sources de conseils sur le contrôle du climat pour les documents d'archives ayant besoin d'une basse température pour durer plus d'une vingtaine d'années : Norme ISO 18934:2011, *Matériaux pour l'image – Archives multimédia – Environnement de stockage*, et *IPI Media Storage Quick Reference*, de l'Image Permanence Institute, rédigé par Adelstein.

Tableau 9 : Les quatre paramètres pour la mise en réserve au frais selon l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
Température non précisée	Fourchette de 8 °C à 16 °C	Température non précisée	Température non précisée
HR non précisée	Fourchette de 30 % à 50 % d'HR	HR non précisée	HR non précisée

Tableau 10 : Les quatre paramètres pour la mise en réserve au froid selon l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
Température non précisée	Fourchette de 0 °C à 8 °C	Température non précisée	Température non précisée
HR non précisée	Fourchette de 30 % à 50 % d'HR	HR non précisée	HR non précisée

Tableau 11 : Les quatre paramètres pour la mise en réserve sous le point de congélation selon l'ASHRAE

Limites supérieure et inférieure à long terme	Moyennes annuelles (valeur de référence)	Ajustements saisonniers par rapport à la moyenne annuelle (valeur de référence)	Variations brèves et gradients spatiaux
Température non précisée	Fourchette de -20 °C à 0 °C	Température non précisée	Température non précisée
HR non précisée	Fourchette de 30 % à 50 % d'HR	HR non précisée	HR non précisée

Avantages et risques pour les collections de la mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation

Les avantages d'une mise en réserve à basse température incluent la prolongation de la durée de vie d'objets qui pourraient être détruits en une ou deux générations si on les conservait à la température de la pièce. (Pour en savoir plus sur la quantification des avantages, consulter [Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie – Explication du Calculateur de durée de vie](#).) De plus, les dommages biologiques sont grandement réduits. Les risques incluent les nombreux effets secondaires de tels systèmes, notamment une humidité élevée ou de la condensation en cas de défectuosité ou d'exposition à l'eau. Il faut emballer correctement les objets pour réduire les risques de condensation lors de leur récupération; l'établissement peut aussi avoir besoin d'un espace de

transition doté d'un climat intermédiaire. Les variations d'humidité de quelques heures, de quelques jours ou même plus longues ne nuisent pas à la plupart des objets bien emballés mis en réserve à basse température. Pour obtenir des estimations plus précises de la durée de vie chimique de tous les types de matériaux à des températures et à une HR données, consulter le Calculateur de durée de vie dans ClimaSpec.

Commentaires sur la mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation

Le chapitre de l'ASHRAE ne contient pas de lignes directrices détaillées sur les variations brèves pour la mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation. Les lecteurs souhaitant concevoir une réserve à basse température sont invités à consulter les différentes normes ISO pour un support donné. La mise en réserve à basse température est également possible pour les collections d'art moderne qui contiennent non seulement des objets d'archives habituels (bandes vidéo et photos en couleur), mais aussi des œuvres d'art et d'art décoratif faites de plastiques instables du XX^e siècle.

Bien que les variations brèves ne soient pas précisées dans les spécifications pour la mise en réserve au frais, au froid et sous le point de congélation de l'ASHRAE, presque toutes les applications pratiques peuvent se faire en tenant pour acquis que les objets (films, photos, bandes vidéo, fourrures et objets faits de caoutchouc ou de plastique) seront emballés dans des contenants ou des sacs hermétiques à l'épreuve des moisissures. L'emballage éliminera toutes les variations de l'HR qui se produiront à l'extérieur pendant moins de quelques jours ou parfois pendant des mois. À l'intérieur de l'emballage, l'objet demeurera à une HR moyenne. Pour obtenir des estimations du contrôle passif de l'HR d'un objet emballé (période d'humidité moyenne), consulter ClimaSpec ou le tableau 4 dans [Aperçu des lignes directrices sur le climat – Annexe C : Les temps de réaction des objets et les multiples avantages des contenants de protection](#).

Les variations modérées de la température (par exemple ± 5 °C), si elles ne sont pas dépassées au cours du fonctionnement normal de systèmes de basse température même de base (aussi bien des chambres fortes conçues sur mesure que des congélateurs ménagers), ne font pas courir de risques à des objets convenablement emballés. Les variations très grandes de la température qui se produisent lors de la récupération ne peuvent cependant pas être ignorées aussi facilement.

La discussion à ce sujet dans le chapitre de l'ASHRAE couvre bien cet enjeu. On y mentionne d'abord que la récupération d'objets mis en réserve à basse température soulève la question des procédures d'acclimatation à utiliser, y compris la possibilité de bâtir un espace de transition. Un tel espace atténue deux risques : la condensation lors de la récupération, qui est le risque principal, et les effets mécaniques directs de la variation de température, qui est un risque mineur. Cependant, l'aménagement d'un espace de transition ajoute de la complexité à la construction et au

fonctionnement d'une réserve à basse température. Il fait également perdre aux petits établissements une part importante de l'espace de mise en réserve.

Le risque principal, soit la condensation, se produit lors du processus de retour à des conditions chaudes ou d'une défaillance du système de refroidissement. Il est donc essentiel que les objets mis en réserve à basse température demeurent à l'intérieur d'emballages ou de sacs à l'épreuve de l'humidité, et que ces emballages demeurent fermés jusqu'à ce que l'objet ait atteint la température de la pièce. « L'emballage réduit la nécessité d'un contrôle étroit des variations de l'humidité dans la réserve à basse température en augmentant le temps de réaction à plusieurs jours ou semaines. » [traduction libre] (ASHRAE, 2023)

Au moment de déplacer des objets qui étaient en réserve à très basse température (-20 °C), de petites quantités de condensation peuvent se former même à l'intérieur de certains emballages, par exemple des boîtes de films (Padfield, 2002) et de gros objets de plastique emballés, et causer ainsi le blanchiment irréversible de certains plastiques (Shashoua, 2004, 2005 et 2008). Malgré ces effets secondaires, la mise en réserve à basse température demeure la seule solution pour la préservation de matériaux particulièrement instables sur le plan chimique (Shahoua, 2014).

Climats spéciaux pour métal ou verre instable

Définition des climats spéciaux pour le métal ou verre instable

Types de collections et de bâtiments : métal ou verre instable dans des bâtiments ou des salles modernes spécialisés

Type de contrôle : contrôle de l'HR pour éviter les taux d'HR critiques d'un sel ou d'un hydrate

Le chapitre de l'ASHRAE ne fournit aucune ligne directrice précise; les établissements devraient établir l'HR critique en fonction de leurs collections et de la documentation existante. Certaines lignes directrices sont données dans ClimaSpec.

Avantages et risques pour les collections de l'utilisation de climats spéciaux pour le métal ou verre instable

Le chapitre de l'ASHRAE ne cite aucun avantage ou risque précis pour ce type de contrôle. On présume que les avantages consistent en la prévention des mécanismes de détérioration qu'entraîne l'hydratation ou la déshydratation des composés des objets, notamment des métaux contaminés. Les risques sont liés aux effets de cette HR particulière sur les autres matériaux d'un objet complexe (par exemple, fracture possible du manche en bois ou en os d'un outil de métal conservé à une très faible

HR pour réduire la corrosion). Pour connaître certains avantages et risques de conditions de température et d'HR précises pour des objets donnés, consulter ClimaSpec.

Bibliographie

Adelstein, P. Z. [*IPI Media Storage: Quick Reference*](#) (format PDF; en anglais seulement), deuxième édition, Rochester (New York), Image Permanence Institute, 2011.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. « Museums, Galleries, Archives, and Libraries », dans *ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications* (sous la direction de M. S. Owen), Atlanta (Géorgie), ASHRAE, 2019, p. 24.1-24.46.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 169-2020, [*Climatic Data for Building Design Standards*](#) (format PDF), Addendum a, [s. l.], ASHRAE, 2021.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. « Museums, Galleries, Archives, and Libraries », dans *ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications* (sous la direction de M. S. Owen), Atlanta (Géorgie), ASHRAE, 2023, p. 24.-24.47.

Groupe BIZOT. [*The Bizot Green Protocol*](#) (format PDF; en anglais seulement), s. l., International Committee for Museums and Collections of Modern Art, 2023.

Organisation internationale de normalisation. ISO 18934:2011, *Matériaux pour l'image – Archives multimédia – Environnement de stockage*, Genève (Suisse), Organisation internationale de normalisation, 2011.

Padfield, T. « [*Condensation in Film Containers During Cooling and Warming*](#) » (format PDF; en anglais seulement), dans *Preserve Then Show* (sous la direction de D. Niseen, et coll.), Copenhague (Danemark), Danish Film Institute, 2002.

Pasqualini, P. [*The Control of Moisture Movement in Buildings Using the Dynamic Buffer Zone*](#), Thèse (Ph. D.), Université de Toronto, 1999.

Schijndel, A.W.M. van, H.L. Schellen et W.J. Timmermans. « Simulation of the Climate System Performance of a Museum in Case of Failure Events », *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 10 (octobre 2010), p. 1790-1796.

Shashoua, Y. « Modern Plastics: Do They Suffer from the Cold? », *Studies in Conservation*, vol. 49, suppl. 2 (2004), p. 91-95.

Shashoua, Y. « Storing Plastics in the Cold: More Harm than Good? », dans *ICOM-CC 14th Triennial Meeting, The Hague, The Netherlands, 12–16 September 2005: Preprints* (sous la direction de I. Verger), Londres (Royaume-Uni), James & James/Earthscan, 2005, p. 358-364.

Shashoua, Y. *Conservation of Plastics: Materials Science, Degradation and Preservation*, Oxford (Royaume-Uni), Butterworth-Heinemann Elsevier, 2008.

Shashoua, Y. « A Safe Place: Storage Strategies for Plastics », *Conservation Perspectives* (printemps 2014), p. 13-15.

Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie

Sur cette page:

- Liste des abréviations
- Explication du Calculateur de moisissures
 - Sources des données et établissement des équations
 - Humidité relative statique et humidité relative dynamique
 - Approche multitactique pour une prévention pratique des moisissures
 - Problèmes de santé
- Explication du Calculateur de durée de vie
 - Deux règles empiriques simples à suivre avant de commencer
 - La notion de durée de vie des objets
 - Données historiques sur les durées de vie de référence
 - Catégories logarithmiques pour la durée de vie des matériaux
 - Graphique de l'effet de la température sur la durée de vie
 - Graphique de l'effet de l'humidité relative sur la durée de vie
 - Courbe de l'effet de la température et de l'humidité relative sur la durée de vie
 - Scénarios complexes dans ClimaSpec
 - Équations de la durée de vie
 - Modèle 1
 - Modèle 2
 - Modèle 3
 - Modèle 4
 - Modèle 5
- Bibliographie

Liste des abréviations

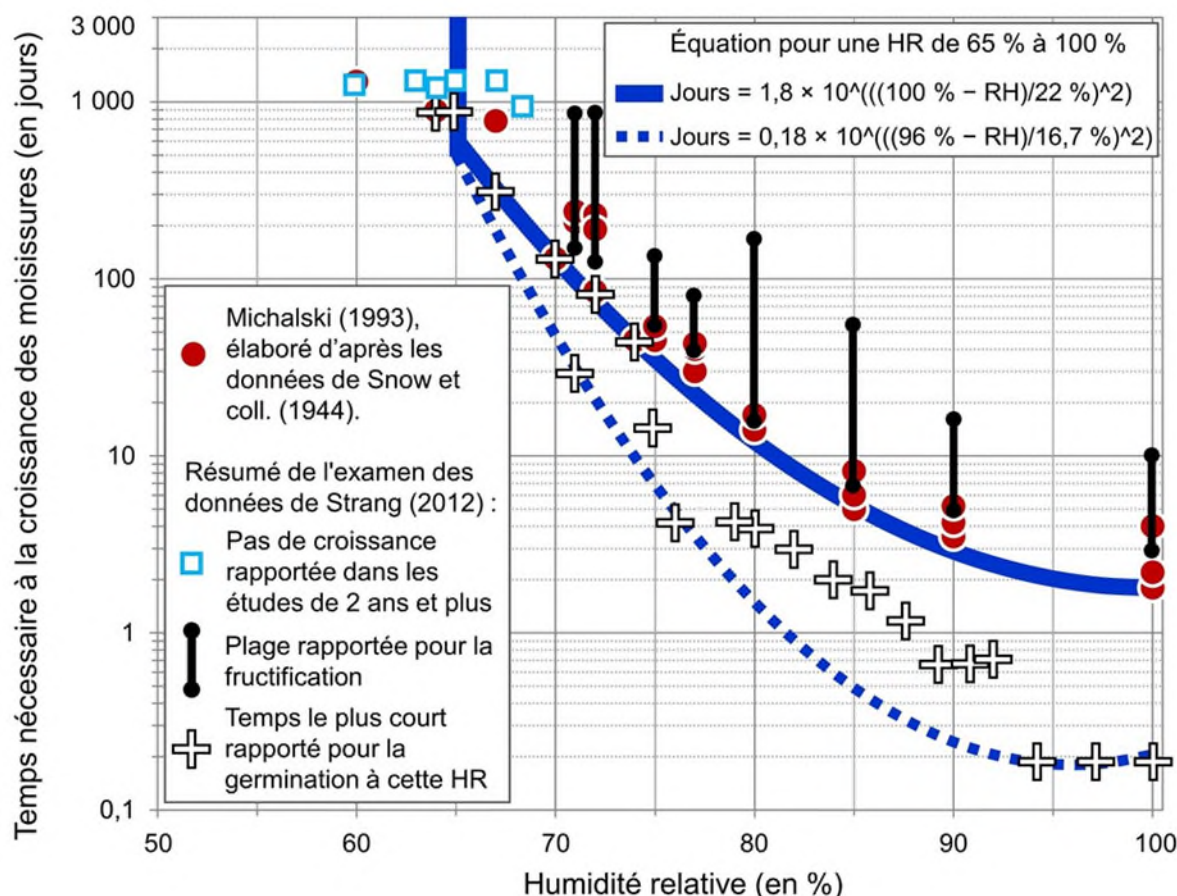
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
RH	humidité relative
ICC	Institut canadien de conservation
ICOM-CC	Comité pour la conservation du Conseil international des musées
IPI	Image Permanence Institute
ISO	Organisation internationale de normalisation

Explication du Calculateur de moisissures

Stefan Michalski et Tom Strang

Sources des données et établissement des équations

La figure 1 présente les données de plusieurs auteurs sur le temps nécessaire à la croissance des moisissures. La ligne bleue continue est une courbe ajustée par Michalski (1993) d'après les données de Snow et coll. (1944) sur le temps nécessaire à l'apparition de mycélium visible sur de l'herbe séchée, du tourteau de lin et de la farine d'os (points noirs). Parmi les denrées alimentaires qu'ont étudiées Snow et coll., celles-ci sont les plus représentatives d'une large classe d'objets de musée, cellulosiques et protéiques. Ces données et la courbe ajustée (ligne bleue pleine) figurent dans des publications antérieures de l'Institut canadien de conservation (ICC), comme la figure 4 dans [Agent de détérioration : humidité relative inadéquate](#) et le Bulletin technique 23 [Directives concernant l'humidité et la température dans les archives du Canada](#). La figure 1 est tirée des éditions de 1999 à 2023 du chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries » du manuel de l'*ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications*. L'équation de l'[humidité relative \(HR\)](#) pour cette courbe (indiquée dans la légende, en haut à droite) sert à calculer le « temps probable nécessaire à la formation de moisissures perceptibles » dans le Calculateur de moisissures de ClimaSpec, qui se trouve dans le menu de gauche.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0020

Figure 1. Relation entre l'HR et le temps (en jours) nécessaire à la croissance des moisissures.

Description de la figure 1

Le graphique de la figure 1 contient deux courbes. L'axe vertical indique, sur une échelle logarithmique de 0,1 à 3 000, le nombre de jours nécessaires à la croissance des moisissures. L'axe horizontal représente une échelle linéaire de 50 % à 100 % d'HR. Les courbes sont toutes deux lisses et partent de 65 % d'HR, en haut à gauche, et descendent pour s'aplatir à 100 %, en bas à droite. Des groupes de points de données correspondent à chaque courbe, décrite dans le texte principal. Le tableau 1 présente une sélection de points clés sur les deux courbes.

Plus récemment, Strang (2012) a compilé davantage de données issues de recherches utilisant des supports conçus pour maximiser la croissance des moisissures, notamment la gélatine. La gélatine est la couche sensible aux moisissures dans les matériaux photographiques, la toile encollée des tableaux et leurs rentoilages, ainsi que les papiers encollés. La figure 1 résume les principaux points de sa compilation. Les lignes verticales noires indiquent les plages de temps de fructification

rapportées pour chaque valeur d'HR. Elles suivent la double ligne rouge pour le mycélium visible, dans la mesure où la fructification se produirait après la croissance du mycélium, c'est-à-dire qu'elle prendrait un peu plus de temps (elle serait supérieure à la double ligne rouge). Les données de germination (un grand nuage dans les graphiques originaux de Strang) sont représentées ici par le bord extérieur de ce nuage, indiquant les temps les plus courts rapportés pour la germination à chaque valeur d'HR (les croix blanches). La ligne tiretée bleue est ajustée de manière à se situer juste à l'extérieur de ces croix blanches. Le calculateur utilise l'équation pour cette ligne tiretée bleue (décrite dans la légende, dans le coin supérieur droit) afin d'indiquer le temps probable le plus court pour la germination des spores.

Tableau 1 : Relation entre le temps (en jours) nécessaire à la croissance des moisissures et différentes valeurs d'HR (en %)

Limites extérieures	HR de 64 %	HR de 65 %	HR de 70 %	HR de 75 %	HR de 80 %	HR de 85 %	HR de 90 %	HR de 100 %
Limite extérieure de la fructification	Aucune depuis plus de 1 000 jours	500	130	35	12	5	3	2
Limite extérieure de la germination	Aucune depuis plus de 1 000 jours	600	50	12	1,5	0,5	0,2	0,2

Remarque : Les nombres du tableau 1 ont été arrondis à un ou à deux chiffres significatifs.

Humidité relative statique et humidité relative dynamique

Sedlbauer (2001) a développé un modèle dynamique pour la croissance des moisissures dans des conditions fluctuantes, modèle qui a été incorporé dans le logiciel de performance des bâtiments connu sous le nom de [WUFI](#) (Wärme Und Feuchte Instationär/transport transitoire de chaleur et d'humidité; en anglais seulement). De tels modèles dynamiques dépassent la portée du Calculateur de moisissures dans ClimaSpec. Nous examinons plutôt les conditions statiques en utilisant les données de nombreuses études dans lesquelles on a maintenu une HR constante, comme il est indiqué à la figure 1, ainsi qu'une température constante.

De manière prudente, on peut appliquer le calculateur à deux conditions fluctuantes. Si l'HR est fluctuante mais toujours supérieure à 65 %, on entre, dans le calculateur, l'HR des périodes les plus

humides. (Cela fournit une valeur prudente : le temps le plus court possible pour la croissance.) Si et quand l'HR descend sous 65 % et y demeure suffisamment longtemps pour que les matériaux atteignent l'équilibre avec cette HR plus faible, alors toute moisissure qui se développerait pourrait être considérée comme morte. (Le cycle de croissance doit recommencer à partir des spores lorsque l'HR dépasse 65 %.)

Approche multitactique pour une prévention pratique des moisissures

Preventive conservation against mould is multifaceted. It is unusual (though not impossible) for high RH (damp) to occur uniformly and in a stable manner throughout a room. Mould is usually a localized event, triggered by external sources of water, condensation, poor ventilation, inappropriate packaging, temperature gradients, etc. (consult figures 5 and 6 in [Agent of deterioration: incorrect relative humidity](#)). Cleanliness of the objects also plays a role, not just in terms of spores but also in terms of nutrients that sustain mould growth. Methods for controlling these factors and many more are described in detail in Technical Bulletin 26 [Mould Prevention and Collection Recovery: Guidelines for Heritage Collections](#).

Problèmes de santé

Les moisissures constituent un grand risque pour les occupants de l'espace, et pas seulement pour les collections. Si vous êtes aux prises avec des problèmes de moisissure, consulter dès que possible le Bulletin technique 26 [Prévention des moisissures et récupération des collections : lignes directrices pour les collections du patrimoine](#). Pour obtenir de plus amples renseignements sur les problèmes de santé liés aux moisissures, ainsi que sur les nombreuses situations qui favorisent les moisissures dans les bâtiments, consulter Adan et Samson (2011).

Explication du Calculateur de durée de vie

Stefan Michalski

Cette section offre une description du contexte technique entourant le Calculateur de durée de vie qui fait partie de ClimaSpec. Ce calculateur fournit des estimations quant à la durée de vie des objets organiques qui se décomposent rapidement en raison de processus chimiques à des températures et à une HR modérées, ainsi que les améliorations possibles au moyen de diverses combinaisons de conditions plus froides ou plus sèches. (Une partie du contenu des sections suivantes est apparue en premier dans l'édition de 2019 du chapitre de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE], préparé par l'auteur à titre de membre du comité responsable de ce chapitre. Ces renseignements ont été révisés ici.)

Les estimations de la durée de vie des objets à température ambiante, listées dans le tableau 2 et fournies dans ClimaSpec, peuvent varier. La durée de vie peut être jusqu'à trois fois plus courte ou

plus longue que celle indiquée pour chaque objet. De même, lors du choix d'une température plus basse et d'une HR inférieure, même en utilisant les meilleurs modèles et données accessibles, l'amélioration de la durée de vie ultérieure peut différer de la prédiction. Cela est principalement dû à l'incertitude de l'énergie d'activation, comme l'illustrent les zones ombrées de la figure 2. Malgré cette incertitude, les calculateurs des avantages sur la durée de vie d'une mise en réserve dans des conditions froides ou au sec sont considérés comme utiles par les auteurs cités, ainsi que par les établissements de recherche qu'ils représentent.

Deux règles empiriques simples à suivre avant de commencer

Avant de décrire les graphiques, les calculateurs et les équations, une simple règle empirique permet de quantifier l'enjeu : une baisse de température de 5 °C (par exemple, de 21 °C à 16 °C) double la durée de vie de l'objet. Cela est vrai pour les matériaux qui se dégradent rapidement en raison de processus chimiques dans des conditions normales de mise en réserve (comme le papier de mauvaise qualité, de nombreux films photographiques et les bandes et disques magnétiques). Une autre baisse de 5 °C double à nouveau la durée de vie de l'objet. Ainsi, une baisse de 21 °C à 11 °C quadruple la durée de vie, et ainsi de suite. À l'inverse, chaque augmentation de 5 °C réduit la durée de vie de moitié.

Une seconde règle empirique est qu'une réduction de moitié de l'HR (par exemple, de 50 % à 25 %) double (ou plus) la durée de vie de l'objet (Michalski, 2002).

Ces règles empiriques peuvent servir de base à l'étude de la mise en réserve à une température contrôlée. Cependant, le calcul de scénarios saisonniers complexes dans un contexte d'économies d'énergie est nécessaire lorsqu'il s'agit de trouver le juste équilibre entre les coûts de la préservation et la durabilité ou encore de prendre en compte les répercussions d'une exposition intermittente à des conditions chaudes ou d'un traitement antiparasitaire à haute température. Le Calculateur de durée de vie dans ClimaSpec répond à ce besoin.

La notion de durée de vie des objets

Le Calculateur de durée de vie produit trois résultats :

- une durée de vie de référence pour l'objet sélectionné à une température modérée (environ 20 °C) et à une HR modérée (environ 50 %);
- le multiplicateur de durée de vie pour un scénario ayant une température et une HR données;
- le produit des deux premiers résultats, c'est-à-dire la durée de vie prévue pour le scénario sélectionné.

L'expression « durée de vie » a une signification claire et sans ambiguïté (plus ou moins) dans le cas des humains. En revanche, pour les objets qui se détériorent, cette notion est plus ambiguë. Pour la préciser, nous devons faire trois jugements difficiles :

- Quelle est la valeur culturelle ou l'utilité de l'objet (par exemple, les objets d'art ayant une valeur esthétique ou les documents conservés en tant que dossiers d'information)?
- Existe-t-il des caractéristiques mesurables qui affectent la valeur, comme le jaunissement, la perte de solidité ou la perte de lisibilité?
- Quel est le critère de perte inacceptable d'une caractéristique particulière (par exemple, un jaunissement inacceptable empêchant une utilisation en exposition ou une solidité insuffisante du document empêchant sa consultation directe par les chercheurs)?

Ces définitions sont sans ambiguïté pour quelques types d'objets patrimoniaux seulement. Par exemple, lorsque les supports numériques ou magnétiques deviennent illisibles, il est clair que leur utilité archivistique en tant que support d'information est « morte ». Le Calculateur de durée de vie dans ClimaSpec fournit toujours une description de la caractéristique qui est attribuée à l'estimation de la durée de vie et, dans la mesure du possible, de ses répercussions sur l'utilité de l'objet. Cependant, il faut toujours interpréter la perte d'utilité et de valeur dans son propre contexte. Une cassette vidéo illisible peut être morte pour une archive, et partiellement morte pour une installation vidéo dans un musée, mais encore utile dans une salle d'exposition qui présente la technologie que l'on pouvait retrouver dans une maison des années 1980.

Pour justifier et concevoir la mise en réserve au froid, on pourrait éviter toute incertitude concernant ces jugements culturels et se contenter de prendre en considération l'amélioration relative de la durée de vie de la collection que fournissent des conditions plus froides et plus sèches, par exemple « 10 fois plus longue » (ce que donne le Calculateur de durée de vie). Cependant, étant donné les coûts de mise en réserve dans des conditions plus froides et plus sèches, il reste à déterminer si, sans ce type de mise en réserve, la durée de vie des objets deviendrait alors trop courte au regard du mandat de préservation de l'établissement. Dans un autre cas, il faudra déterminer si la durée de vie de certains matériaux sera considérablement réduite à l'aide d'un traitement antiparasitaire à haute température.

Dans les établissements d'archives, il est devenu courant d'utiliser des chambres froides pour des collections entières (les films photographiques en sont un exemple). Ce n'est pas le cas dans les musées, ce qui peut entraîner la détérioration de nombreux objets du XX^e siècle au cours de la vie d'un conservateur. Ces objets comprennent le caoutchouc, le celluloid, les acétates, les mousses de polyuréthane, les photographies en couleurs, etc. (consulter la colonne de droite du tableau 2).

Données historiques sur les durées de vie de référence

Les données de référence du tableau 2 ont été compilées pour la première fois dans le Bulletin technique 23 [Directives concernant l'humidité et la température dans les archives du Canada](#). Cette publication contient également des notes et références détaillées sur la plupart des matériaux présentés dans le tableau. Lorsque le tableau a été préparé pour la ressource de l'ICC [Agent de détérioration : température inadéquate](#), des documents non archivistiques ont été ajoutés. Cependant, les entrées relatives aux disques optiques ont été supprimées, car des estimations plus précises de la durée de vie se trouvent dans la Note de l'ICC 19/1 [Durabilité des CD, des DVD et des disques Blu-ray inscriptibles](#). Les durées de vie vont de 5 ans à plus de 100 ans, selon le processus de fabrication.

La version finale du tableau est utilisée ailleurs sur le site Web de l'ICC et a également été incluse dans les éditions de 2019 et de 2023 du manuel de l'ASHRAE, dans le chapitre « Museums, Galleries, Archives, and Libraries ».

Dans ClimaSpec, les durées de vie de référence fournies sont basées sur ces sources et d'autres.

Tableau 2 : Durées de vie de référence des matériaux à des valeurs modérées de température (environ 20 °C) et d'HR (environ 50 %)

Durée de vie de référence	Matériaux
1 000 ans	- Bois, colle, lin, coton, cuir, papier chiffon, parchemin, peinture à l'huile, tempera à l'œuf, aquarelle et gesso : il existe des exemples utilisables de tous ces matériaux, vieux d'un à trois millénaires, provenant de sépultures ou d'enceintes sèches à environ 20 °C. Les matériaux dans ces exemples ont été protégés de toute exposition à l'acide, comme la pollution atmosphérique de la révolution industrielle, et n'ont jamais été humides. - La peau, les os et l'ivoire du mammoth laineux ont survécu intacts pendant plus de 40 millénaires alors qu'ils étaient congelés.
300 ans	Il s'agit de la meilleure estimation actuelle pour les matériaux photographiques stables qui pourraient demeurer utilisables en tant qu'images avec peu ou pas de changement (par exemple, les négatifs en noir et blanc sur verre du XIX^e siècle et les négatifs en noir et blanc sur un film de polyester du XX^e siècle).

100 ans	• Le papier acide et certains films deviennent cassants et bruns, ce qui rend leur consultation difficile (par exemple, le papier journal et les livres ou papiers de mauvaise qualité fabriqués après 1850). • Le film en acétate se rétracte et la couche d'image se fissure. • Le celluloïd et de nombreux plastiques anciens jaunissent, se fissurent et se déforment. • Les matériaux naturels acidifiés par la pollution (les textiles et le cuir) se fragilisent et peuvent se désagréger.
30 ans	• Les supports magnétiques classiques commencent à être illisibles (par exemple, les disquettes et les bandes vidéo, audio ou de données). • Les matériaux photographiques les moins stables se dégradent (par exemple, les épreuves couleur s'estompent à l'obscurité, les articles mal traités jaunissent et se désintègrent, et le nitrate de cellulose jaunit et se désintègre plus rapidement lorsqu'il est emballé en grande quantité). • De nombreux polymères élastiques, du caoutchouc aux mousses de polyuréthane, deviennent cassants ou collants ou se désintègrent. • Certaines peintures acryliques sur certaines toiles jaunissent rapidement.

Catégories logarithmiques pour la durée de vie des matériaux

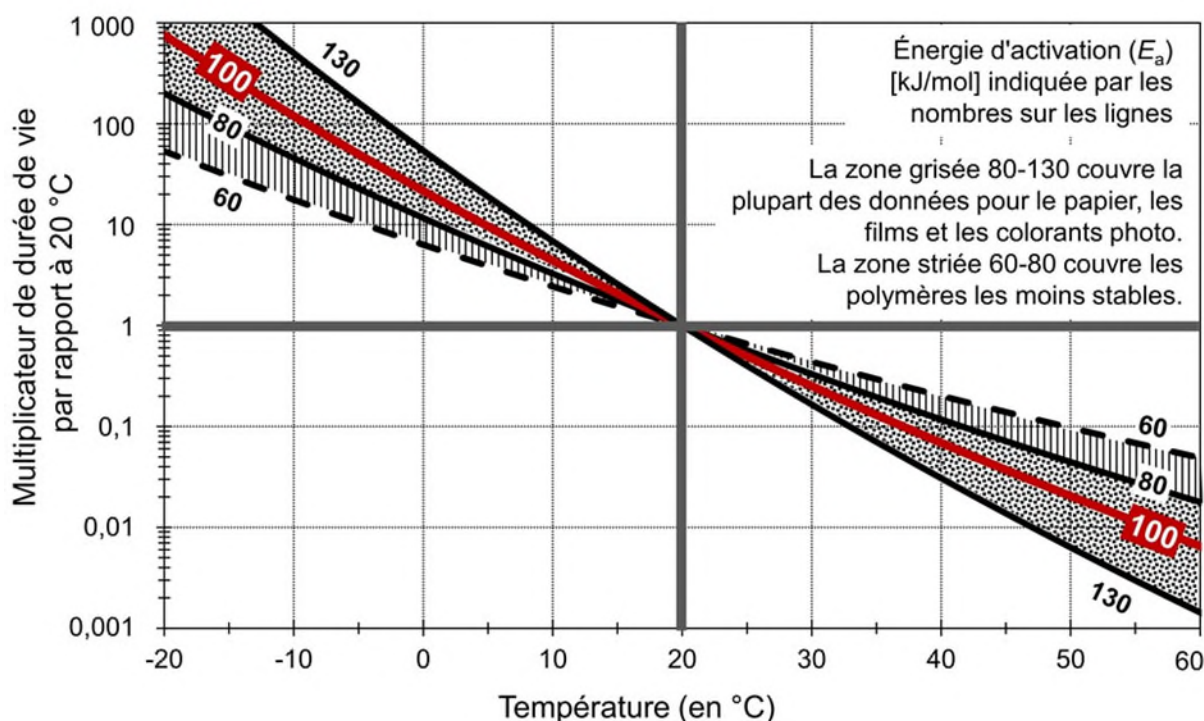
On décrit généralement notre vie et les événements historiques en unités temporelles linéaires et uniformes, exprimées en années ou en décennies. Cela ne fonctionne pas bien pour catégoriser la durée de vie chimique des matériaux, qu'il vaut mieux exprimer sous forme de multiples. Par exemple, chaque catégorie peut être plusieurs fois plus longue que sa voisine. La question qui se pose alors est la suivante : Dans quelle mesure pouvons-nous séparer de telles catégories avec précision? L'ICC a constaté que les catégories du tableau 2 (30 ans, 100 ans, 300 ans et 1 000 ans) suffisent pour les généralisations pratiques. En termes techniques, ces catégories suivent une échelle logarithmique (base 10), avec deux échelons pour chaque unité logarithmique. Le point médian entre 1 et 10 est $10^{1/2} = 3,16$, valeur arrondie à 3 pour plus de simplicité.

Pour quelques matériaux bien étudiés, comme le papier et les pellicules photographiques, si l'on connaît l'acidité et que l'on a une définition nette de leur fin de vie, on peut être en mesure de faire des prédictions plus précises que ce qu'indiquent ces catégories logarithmiques. En général, dire qu'un matériau tel que le papier acide est dans le groupe des 100 ans dans le tableau 2 signifie que sa durée de vie est probablement d'environ 100 ans. Cependant, elle peut être inférieure ou supérieure d'un facteur de trois. Ainsi, chaque catégorie présente une incertitude qui s'étend à ses catégories adjacentes.

Graphique de l'effet de la température sur la durée de vie

Le paramètre chimique clé pour prédire l'effet du changement de température sur le multiplicateur de durée de vie est l'énergie d'activation (E_a). Une compilation des énergies d'activation des matériaux organiques présents dans les collections patrimoniales (Reilly et coll., 1995; Nishimura, 1996; Michalski, 2002), comme le papier, les films, les colorants photographiques, les supports magnétiques et les vernis en résine, montre que pour plus des trois quarts des matériaux étudiés, l'énergie d'activation se situe dans une plage de 80 kJ/mol à 120 kJ/mol. Une étude récente de la dégradation thermique de la résistance du bois donne une valeur $E_a = 85$ kJ/mol, ce qui est également dans cette plage (Froidevaux et Navi, 2013). Plus récemment encore, on a mesuré des valeurs de 93 kJ/mol à 130 kJ/mol dans différents papiers d'impression modernes. Sur la figure 2, cette plage complète de 80 kJ/mol à 130 kJ/mol est représentée par la zone grisée.

On peut aussi calculer théoriquement cette plage d'énergies d'activation sans tenir compte de matériaux en particulier, si ce n'est en précisant que le processus chimique prend au moins plusieurs décennies pour arriver à terme aux températures ambiantes (Michalski, 2002). Ainsi, les données empiriques et la théorie semblent indiquer que cette plage d'énergies d'activation peut servir de valeur universelle pour les matériaux patrimoniaux, comme ceux qui figurent dans le tableau 3. La valeur médiane de cette plage, soit 100 kJ/mol, un chiffre rond pratique, a été choisie pour les graphiques des multiplicateurs de durée de vie dans le Bulletin technique 23 [Directives concernant l'humidité et la température dans les archives du Canada](#).



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0022

Figure 2. Relation entre la durée de vie et la température selon différentes énergies d'activation (E_a).

Description de la figure 2

Le graphique de la figure 2 contient quatre courbes. L'axe vertical représente une échelle logarithmique du multiplicateur de durée de vie par rapport à 20 °C. L'axe horizontal représente la température en degrés Celsius. Les quatre courbes sont toutes des courbes régulières qui s'étendent du coin supérieur gauche au coin inférieur droit et se croisent à 20 °C et à une durée de vie de 1.

Tableau 3 : Relation entre le multiplicateur de durée de vie et la température selon différentes énergies d'activation (E_a)

Énergie d'activation (E_a) en kJ/mol	-20 °C	-10 °C	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	60 °C
130	5500	500	54	20	7	2,6	1	0,4	0,2	0,002
100	750	120	20	10	4	2,1	1	0,5	0,3	0,007
80	200	45	12	6	3	1,8	1	0,6	0,3	0,02
60	60	20	6	4	2	1,6	1	0,7	0,4	0,05

Remarque : Les nombres du tableau 3 ont été arrondis à un ou à deux chiffres significatifs.

Pour les matériaux qui se dégradent de manière importante en quelques décennies ou moins, comme le polyuréthane de polyester qui peut se désintégrer en poudre (c'est d'ailleurs le maillon faible des supports magnétiques, et c'était un matériau populaire auprès des artistes à la fin du XX^e siècle) ou les vernis à base de résine naturelle qui jaunissent de manière inacceptable, les énergies d'activation tombent dans une plage inférieure de 60 kJ/mol à 80 kJ/mol (Michalski, 2000), indiquée par la zone rayée de la figure 2.

Graphique de l'effet de l'humidité relative sur la durée de vie

Bien que tous les auteurs s'accordent sur le rôle de la température et de l'énergie d'activation dans le calcul du multiplicateur de durée de vie, il existe une variété de modèles permettant de calculer l'effet

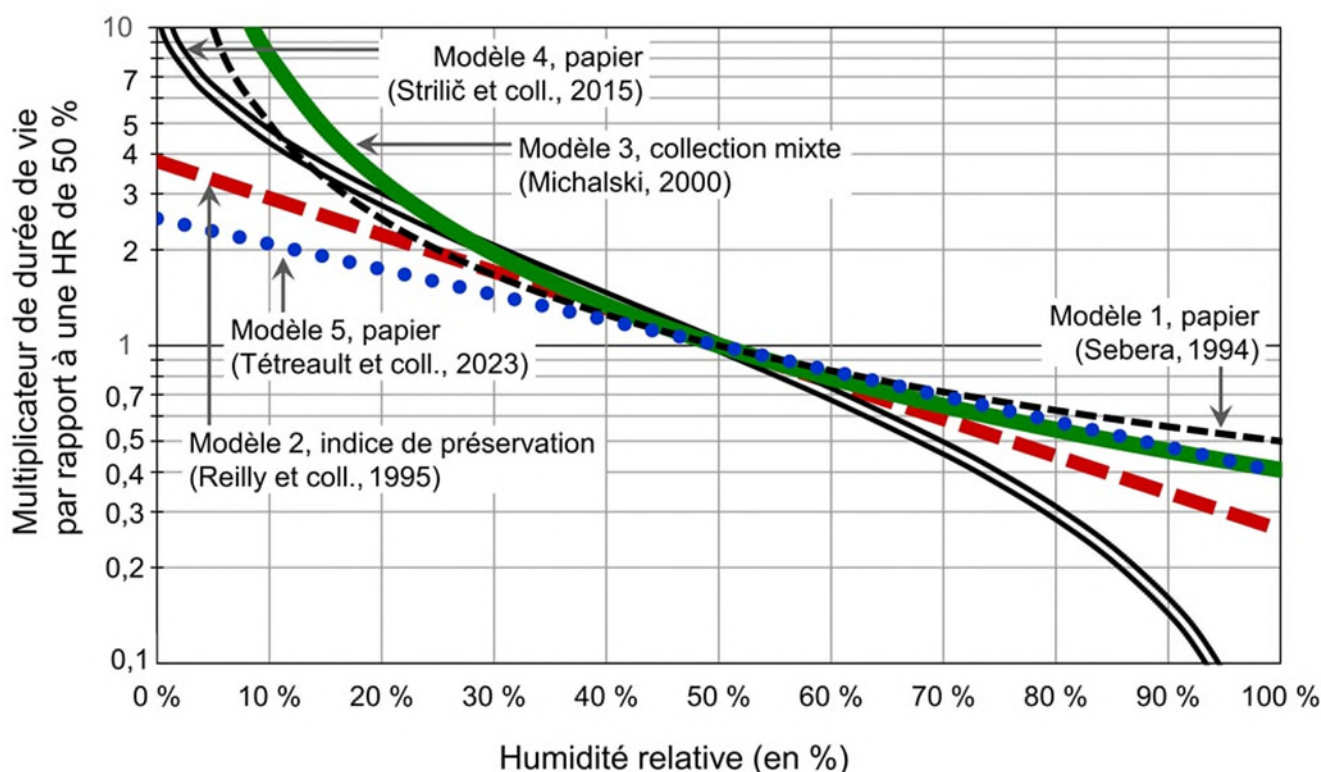
de l'HR. Tous s'accordent à dire qu'une faible HR diminue la vitesse de désintégration, mais l'ampleur exacte de cette valeur reste incertaine, simplement parce qu'il n'y a pas assez de données expérimentales pour confirmer un modèle plutôt qu'un autre.

Les cinq modèles les plus connus, par ordre chronologique, sont les suivants (le fondement technique de chaque modèle est examiné dans une section ultérieure, [Équations de la durée de vie](#)) :

1. Le travail de pionnier de Sebera (1994), popularisé dans un rapport pour la Commission on Preservation and Access. Il a inventé le terme « isoperme » pour désigner les lignes de même durée de vie dans les graphiques, comme sur la figure 4.
2. L'indice de préservation de l'Image Permanence Institute (IPI), initialement fourni sous la forme d'une roue de préservation, désormais accessible dans une application Web, [eClimateNotebook](#) (en anglais seulement). L'outil est basé sur le tableau des multiplicateurs de Reilly et coll. (1995).
3. Les équations et les tableaux publiés dans le Bulletin technique 23 [Directives concernant l'humidité et la température dans les archives du Canada](#).
4. Les équations et les graphiques publiés dans des articles de revues par des chercheurs de l'University College London et des Archives nationales de Londres (Strlič et coll., 2015).
5. Des chercheurs de l'ICC et du Centre de recherche sur la conservation (Paris) ont publié des équations et des graphiques pour des types précis de papiers d'impression (Tétreault et coll., 2023). Ces équations et graphiques sont également offerts sous forme d'un outil de calcul (Outil de calcul de la permanence du papier), qui se trouve sur la page [Outils de conservation préventive](#).

Les prédictions des cinq modèles concernant l'effet de l'HR sur la durée de vie par rapport à la durée de vie pour une HR de 50 % sont représentées sur la figure 3. Dans la région ayant une HR de 30 % à 60 %, les modèles se chevauchent sans différences pratiques dans leurs prédictions. Le passage de 50 % à 25 % d'HR augmente la durée de vie de deux fois ou un peu plus pour tous les modèles, comme le donne à penser la règle empirique. De toute façon, on doit éviter les conditions supérieures à 60 % d'HR pour réduire le risque que les couches de gélatine des photographies collent aux surfaces adjacentes et le risque de moisissure, qui commence à 65 % d'HR (consulter le Calculateur de moisissures dans ClimaSpec). En général, il faut éviter les conditions inférieures à 25 % d'HR afin de réduire le risque de déformation ou de fracture.

En résumé, les cinq modèles donnent des prédictions similaires dans la région qui est considérée comme pratique pour la plupart des collections. Cela dit, l'éventuelle dessiccation massive de collections, comme les piles de journaux, qui peuvent tolérer une HR inférieure à 25 % (ce qui serait beaucoup moins énergivore qu'une mise en réserve au froid équivalente) sera mieux prédite par le modèle le plus apte à prédire les multiplicateurs de durée de vie en dessous de 25 % d'HR.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0023

Figure 3. Effet de l'HR sur le multiplicateur de durée de vie, par rapport à une HR de 50 % et à une température de 20 °C environ, selon cinq modèles.

Description de la figure 3

Le graphique de la figure 3 contient cinq courbes. L'axe vertical représente une échelle logarithmique de la durée de vie à une HR de 50 %. L'axe horizontal représente l'HR. Les cinq courbes sont toutes des courbes régulières qui s'étendent du coin supérieur gauche au coin inférieur droit et se croisent à une HR de 50 % et à un multiplicateur de durée de vie de 1. Les courbes correspondent aux modèles 1, 2, 3, 4 et 5.

Tableau 4 : Relation entre le multiplicateur de durée de vie et l'HR à environ 20 °C

Modèle	HR de 10 %	HR de 20 %	HR de 30 %	HR de 40 %	HR de 50 %	HR de 60 %	HR de 70 %	HR de 80 %
1 Sebera	5,0	2,5	1,7	1,3	1	0,83	0,71	0,62

2 Reilly et coll.	2,9	2,2	1,7	1,3	1	0,77	0,59	0,45
3 Michalski	8,1	3,3	1,9	1,3	1	0,79	0,65	0,54
4 Strlič et coll.	4,6	2,9	2,0	1,4	1	0,70	0,48	0,30
5 Tétreault et coll.	2,1	1,7	1,4	1,2	1	0,82	0,68	0,57

Courbe de l'effet de la température et de l'humidité relative sur la durée de vie

Sebera (1994), le premier auteur à proposer une représentation graphique de la relation entre la durée de vie, la température et l'HR, a utilisé un graphique rectangulaire, comme le montre la figure 4, et appelé « isopermes » les lignes de durée de vie constante. Strlič et coll. (2015) ont proposé le terme « isochrones ». La figure 4 présente les modèles actuels 2, 3, 4 et 5. Bien que les auteurs du modèle 5 proposent des E_a différentes pour différents types de papiers d'impression, leur modèle est tracé selon une E_a égale à 101 kJ/mol. Il s'agit, selon les auteurs, de l' E_a du papier journal acide.

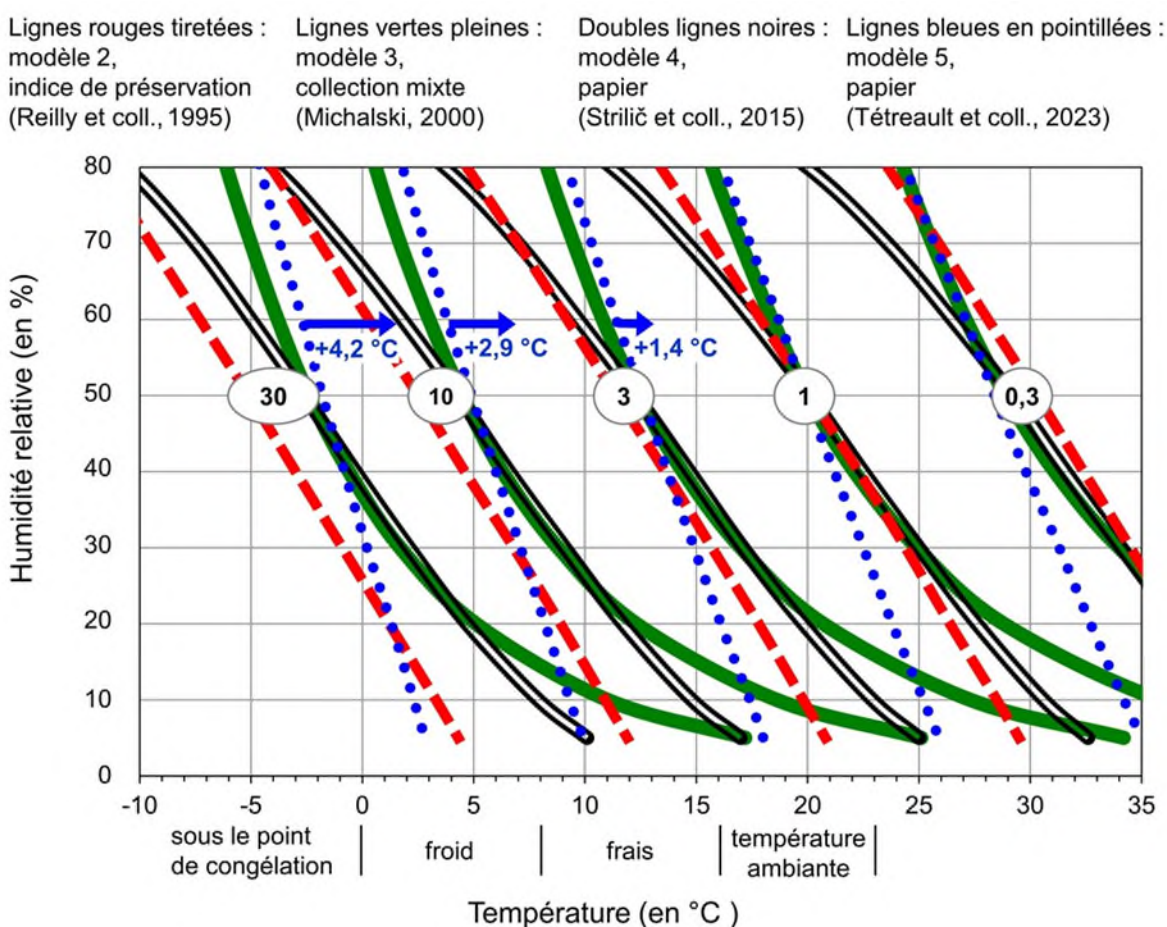
Ces quatre modèles donnent des résultats presque identiques dans la plage pratique d'HR (de 60 % à 30 %) et dans la majorité de la plage pratique de températures. Le modèle de l'IPI prédit que les températures peuvent être jusqu'à trois degrés de moins que les deux autres modèles pour la même durée de vie, mais ce n'est pas une différence significative lorsqu'on décide d'adopter la mise en réserve au frais ou au froid.

Plutôt que le seul modèle de l'ICC, les quatre modèles actuels (2, 3, 4 et 5) sont présentés aux figures 4 et 5 et dans les tableaux connexes, ainsi que sous [Équations de la durée de vie](#), et ce, pour deux raisons. D'abord pour fournir au lecteur une comparaison impartiale des modèles actuels; ensuite, pour montrer que si les différences sont intéressantes pour les chercheurs, les conclusions sont identiques sur le plan pratique : dans la mesure du possible, il faut recourir à la mise en réserve au frais ou au froid pour les objets qui se dégradent rapidement.

La figure 5, qui représente un diagramme psychrométrique, est une autre méthode de représentation graphique des multiplicateurs de durée de vie (isopermes et isochrones). Ce graphique montre la manière classique dont les ingénieurs représentent la température et l'HR lors de la conception de

systèmes. L'axe horizontal représente la température et l'axe vertical représente le poids de la vapeur d'eau dans l'air ([humidité absolue](#)). Les valeurs d'HR constituent un ensemble de lignes courbes (de 10 % jusqu'à 100 %, soit l'HR maximale).

Si l'on veut, par exemple, trouver des combinaisons de température et d'HR qui donnent des durées de vie, pour les matériaux, 10 fois plus grandes que celles indiquées dans le tableau 2, il faut rechercher les courbes « ×10 » sur la figure 4 ou 5 (ou dans la colonne « ×10 » du tableau 5). On constatera alors que pour une HR de 50 %, les trois modèles se situent entre 3 °C et 5 °C, donc environ 4 °C. Si l'on choisit une HR de 30 %, le multiplicateur ×10 se situe alors entre 7 °C et 9 °C, donc environ 8 °C.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0025

Figure 4. Multiplicateurs de durée de vie (isopermes et isochrones) pour les modèles 2, 3, 4 et 5, tracés selon des coordonnées rectangulaires de température et d'HR. (Le modèle 5 est tracé selon le papier journal que les auteurs ont analysé et dont l' E_a est de 101 kJ/mol. Les flèches bleues montrent le décalage avec les autres types de papiers analysés, qui ont une E_a de 127 kJ/mol.) Les plages de

température intitulées « sous le point de congélation » « froid », « frais » et « température ambiante » sont celles définies dans les normes ISO pour le stockage de différents types de supports (ISO, 2011).

Description de la figure 4

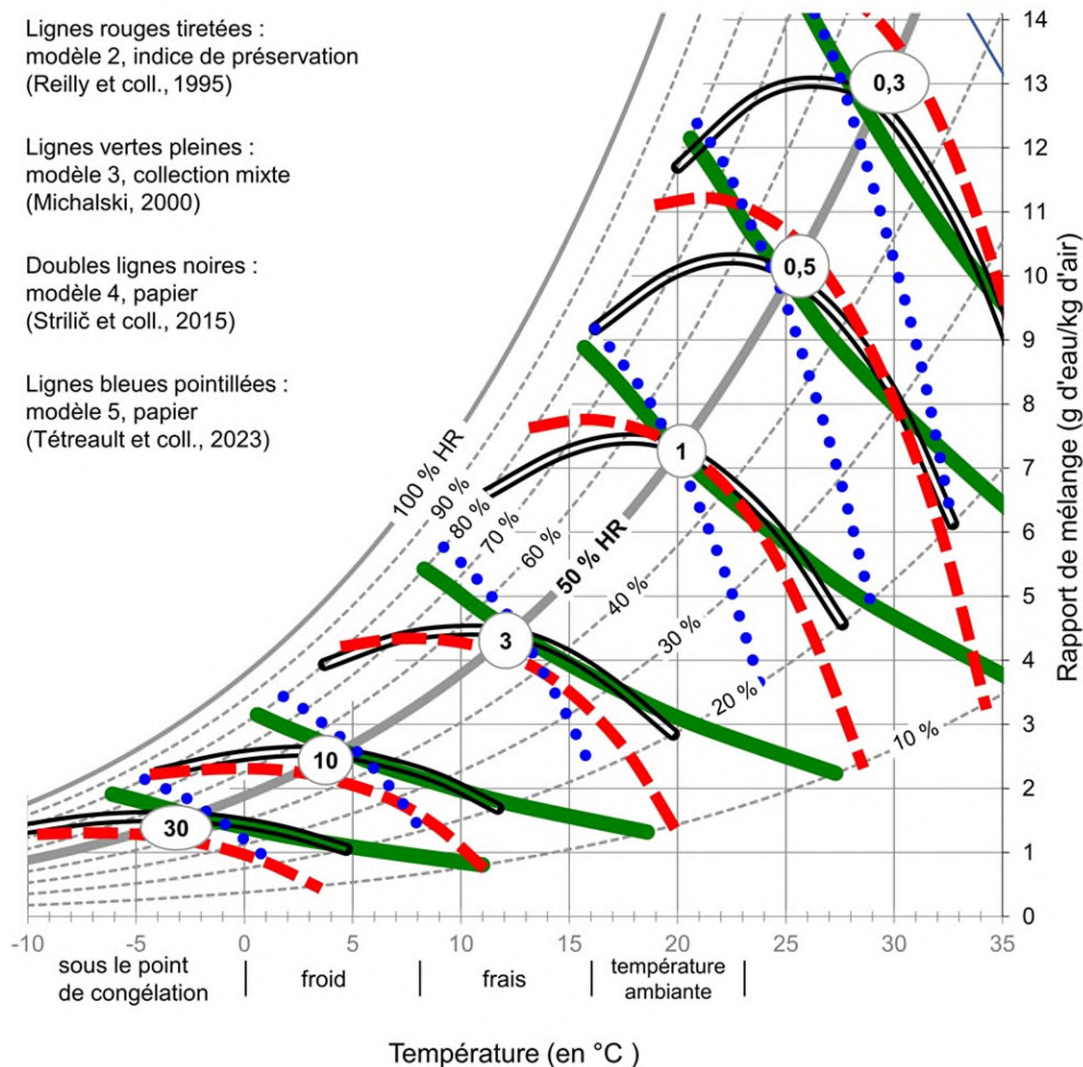
Le graphique de la figure 4 contient cinq groupes de quatre courbes chacun. L'axe vertical représente l'HR. L'axe horizontal représente la température en degrés Celsius. Les cinq groupes sont approximativement parallèles. Les courbes sont régulières et fortement inclinées vers le bas. Chacun des cinq groupes est désigné par un multiplicateur de durée de vie relative, allant d'un minimum de $\times 0,3$ à un maximum de $\times 30$. Les quatre courbes « $\times 1$ » passent toutes par le point 20 °C pour une HR de 50 %.

Tableau 5 : Températures (en °C) à différents pourcentages d'HR pour une valeur donnée du multiplicateur de durée de vie

Multiplicateur de durée de vie	$\times 0,3$ pour les modèles 2, 3, 4 et 5	$\times 1$ pour les modèles 2, 3, 4 et 5	$\times 3$ pour les modèles 2, 3, 4 et 5	$\times 10$ pour les modèles 2, 3, 4 et 5	$\times 30$ pour les modèles 2, 3, 4 et 5
HR de 10 %	39, 46, 40, 34	29, 36, 31, 25	20, 27, 23, 17	11, 19, 15, 9	3, 11, 8, 2
HR de 20 %	37, 38, 32, 33	26, 29, 28, 24	18, 21, 20, 16	9, 12, 12, 8	1, 5, 5, 1
HR de 30 %	35, 34, 34, 31	24, 25, 25, 23	16, 17, 17, 15	7, 9, 9, 7	-1, 2, 2, 0
HR de 40 %	32, 31, 32, 30	22, 22, 23, 21	14, 14, 15, 14	5, 6, 7, 6	-3, -1, 0, -1
HR de 50 %	30, 29, 29, 28	20, 20, 20, 20	11, 12, 12, 13	3, 5, 4, 5	-5, -2, -3, -2
HR de 60 %	28, 27, 27, 27	18, 18, 18, 19	9, 11, 10, 11	0, 3, 2, 4	-7, -4, -5, -3
HR de 70 %	26, 26, 24, 26	16, 17, 15, 17	7, 10, 7, 10	-2, 2, -1, 3	-9, -5, -7, -4

Remarques :

1. Certaines valeurs indiquées dans le tableau 5 dépassent l'échelle des figures 4 et 5.
2. Le modèle 5 est tracé selon le papier journal que les auteurs ont analysé et dont l' E_a est de 101 kJ/mol.



© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation. 132715-0027

Figure 5. Multiplicateurs de durée de vie des modèles 2, 3, 4 et 5 reportés sur le graphique psychrométrique. Les plages de température « sous le point de congélation », « froid », « frais » et « température ambiante » sont celles définies dans les normes de l'ISO relatives au stockage des

supports. (Dans les éditions de 2019 et de 2023 du chapitre de l'ASHRAE, une erreur d'impression a fait disparaître les lignes du modèle 3 de la figure.)

Description de la figure 5

Le graphique de la figure 5 contient six groupes de quatre courbes. L'axe horizontal représente la température en degrés Celsius. L'axe vertical représente le rapport de mélange, en grammes d'eau par kilogramme d'air. Les lignes d'HR, de 10 % à 100 %, s'incurvent doucement vers le haut sur ces axes et forment un ensemble de coordonnées de fond pour les courbes principales. Les six groupes de quatre courbes sont courbés de façon régulière. Chaque groupe est désigné par un multiplicateur de durée de vie relative, allant d'un minimum de $\times 0,3$ à un maximum de $\times 30$. Les quatre courbes « $\times 1$ » passent toutes par le point 20 °C et une HR de 50 %.

Scénarios complexes dans ClimaSpec

Le Calculateur de durée de vie de ClimaSpec présente plusieurs avantages par rapport aux graphiques et aux tableaux :

- Il permet de saisir des scénarios complexes avec des réductions saisonnières sur une base mensuelle pour réaliser des économies d'énergie.
- Il permet de calculer l'effet d'un retrait occasionnel d'objets mis en réserve dans des conditions plus chaudes ou plus humides.
- Il emploie des valeurs spécifiques de l'énergie d'activation pour le matériau, lorsque ces valeurs existent.

Le Calculateur de durée de vie choisit par défaut le modèle 3, conformément aux autres publications de l'ICC.

Équations de la durée de vie

Tous les calculateurs de durée de vie proposés dans la documentation scientifique sur la science de la conservation reconnaissent que, pour les matériaux organiques qui se décomposent rapidement en raison de leur instabilité chimique (comme les matériaux figurant dans la colonne de droite du tableau 2), le mécanisme en cause est l'hydrolyse acide. Elle augmente avec l'acidité du matériau, l'HR et la température. La durée de vie peut être exprimée comme le produit de trois fonctions (f) : une fonction dépendant de l'acidité du matériau, une fonction dépendant de la température et une fonction dépendant de l'HR ou, pour certains auteurs, du paramètre connexe, soit la teneur en humidité.

$$\text{Équation 1 : } t_{DV} = C * f(\text{pH}) * f(T) * f(\text{HR}, \text{TH})$$

Où

C = constante pour chaque matériau (en unités de temps)

pH = acidité du matériau

t_{DV} = durée de vie (en unités de temps)

T = température (en kelvins)

HR = humidité relative (sans dimension)

TH = teneur en humidité (du matériau) [sans dimension]

L'équation de la durée de vie en fonction de la température (le deuxième terme de l'équation 1), du nom de son découvreur, Svante Arrhenius, est utilisée depuis plus d'un siècle en génie chimique. En termes de durée de vie (plutôt que de la réciproque, soit la vitesse de réaction), l'équation d'Arrhenius est la suivante :

Équation 2 : $f(T) = \exp(E_a / (R \cdot T))$

Où

R = constante des gaz parfaits (constante de Boltzmann) [8,314 J/(mol K)]

E_a = énergie d'activation (en J/mol)

Pour faciliter la comparaison, les propositions des cinq auteurs concernant la durée de vie en fonction de l'HR et de la température ont été réarrangées sous la même forme générale de l'équation 1. Si nous présentons ces cinq propositions, ce n'est pas pour indiquer une quelconque préférence ni pour critiquer leur validité respective. Chacune d'elles a été publiée dans des revues avec comité de lecture au cours des 30 dernières années. Le but est plutôt de montrer que, malgré les différences dans la façon dont elles sont établies et dans les matériaux décrits, leurs prédictions quant aux avantages de la mise en réserve au frais et au froid convergent vers des plages utiles pour les gestionnaires de collections.

Dans chacune des équations suivantes, la constante (C) a été fixée de manière que l'équation donne le multiplicateur de durée de vie (t_{MDV}) par rapport à la durée de vie à 20 °C et à 50 % d'HR. Pour plus de clarté, le terme d'énergie d'activation a été placé entre accolades { }.

Modèle 1

Bien qu'il ne soit pas représenté sur les figures 4 et 5, le modèle d'isopermes de Sebera (1994) est

mentionné ici pour son importance historique dans le domaine de la préservation des archives. Sebera a utilisé une forme modifiée de l'équation d'Arrhenius, qui inclut une seconde dépendance à la température placée à l'extérieur de l'exponentielle. Les auteurs ultérieurs l'ont omise, car elle a un effet relativement mineur. Pour l'énergie d'activation, Sebera a examiné les données disponibles pour le papier et a proposé une plage entre deux valeurs : 125 kJ/mol et 146 kJ/mol (25 et 35 dans ses unités originales de kCal/mol). Ses estimations de E_a sont supérieures aux valeurs actuellement acceptées (issues d'études ultérieures), de sorte que ses isopermes exagèrent les avantages de la mise en réserve au froid. En l'absence de toute donnée contraire, il a supposé que la durée de vie était simplement proportionnelle à l'HR. L'équation de Sebera devient alors :

$$\text{Équation 3 : } t_{MDV} = C * 1/T * \exp\{[125 \text{ ou } 146]/(R*T)\} * (1/HR)$$

Où

t_{MDV} = multiplicateur de durée de vie, par rapport à une valeur de 1 °C à 20 °C et à une HR de 50 %

Modèle 2

Les auteurs (Reilly et coll., 1995) ont établi les paramètres à partir de nombreuses données sur les films en acétate. Les équations n'ont pas été publiées telles quelles, mais le tableau publié de multiplicateurs de durée de vie produit par les auteurs peut être ajusté à l'équation suivante. Le terme HR comporte une petite correction de température. L'équation de Reilly et coll. est la suivante :

$$\text{Équation 4 : } t_{MDV} = 4,69E-17 * \exp\{[94,9]/(R*T)\} * \exp[HR * (0,02087 * T - 8,79)]$$

Modèle 3

L'auteur (Michalski, 2000) a calculé l'énergie d'activation à la suite d'un vaste examen de données pour le papier, les films et les colorants. La dépendance à l'égard de l'HR a été calculée à partir d'une nouvelle analyse (Michalski, 1993) de nombreuses données sur le vieillissement du papier à plusieurs valeurs d'HR, produite par Graminski et coll. (1978). L'équation de Michalski devient alors :

$$\text{Équation 5 : } t_{MDV} = 6,17E-19 * \exp\{[100]/(R*T)\} * (1/HR)^{1,3}$$

Modèle 4

Les auteurs (Strlič et coll., 2015) ont établi les équations à partir de leurs nombreuses données sur les papiers neufs et anciens. Le terme HR comporte une petite correction de température. L'équation de Strlič et coll. est la suivante :

$$\text{Équation 6 : } t_{MDV} = 9,468E-21 * \exp\{[119]/(R*T)\}$$

$$* \exp[-36,72 * \{\ln(1 - HR) / (1,67 * T - 741,82)\}^{(1/(5,7622 - 0,012 * T))}]$$

Bien que l'équation 6 complète soit utilisée pour les figures 4 et 5, il est instructif de voir à quoi ressemble le modèle 4 s'il est ajusté à une équation de la même forme que celle des modèles 1, 2 et 3. Dans toute la plage pratique des valeurs d'HR (20 % à 60 %) et de températures (20 °C à -10 °C), l'équation suivante donne des résultats à 10 % près des résultats de l'équation 6 en utilisant une énergie d'activation (E_a) de 100 kJ/mol :

$$\text{Équation 7 : } t_{MDV} = 1,00E-17 * \exp\{[100]/(R * T)\} * \exp[-3,7 * HR]$$

Modèle 5

Les auteurs (Tétreault et coll., 2023) ont établi une équation à partir d'une étude sur les papiers d'impression modernes. Bien que l'acidité (pH) ait joué un rôle clé dans la durée de vie des types de papiers analysés, ils ont découvert qu'une équation pour les multiplicateurs de durée de vie pouvait être indépendante de l'acidité. Leur principale conclusion est que différents groupes de papiers d'impression modernes ont des E_a suffisamment différentes (97 kJ/mol à 130 kJ/mol) pour qu'il soit utile de prendre en compte ces différences, comme le permet l'Outil de calcul de la permanence du papier, qui est basé sur leur modèle et qui se trouve sur la page [Outils de conservation préventive](#). Leur équation pour les isopermes, soit la durée de vie relative, est la suivante (Tétreault et coll., 2023; équation 14) :

$$\text{Équation 8 : } t_{MDV} = 2,46 * \exp[(0,572 - 0,00822 * T)HR] * \exp[\{E_a\}/R] * (1/T - 1/293,15)$$

Pour les figures et tableaux du présent document, et dans un souci de comparaison généralisée entre les modèles, leur modèle est calculé selon une E_a de 101 kJ/mol, soit leur valeur pour le papier journal acide.

En résumé, lorsqu'on utilise une équation de la même forme que l'équation 1, les modèles 2, 3, 4 et 5 semblent tous indiquer une énergie d'activation très similaire (E_a), autour de 95 à 101 kJ/mol. Le modèle 5 suggère des valeurs plus élevées pour certains types de papiers d'impression.

Toutefois, pour ce qui est de l'effet de l'HR, il existe des différences significatives entre les modèles pour les valeurs inférieures à 20 % et ceux pour les valeurs supérieures à 60 %. Il n'y a pas assez de données à ces extrêmes d'HR pour déterminer lequel est correct. Parmi les différents modèles, le terme HR diffère de deux façons. Tout d'abord, Reilly et coll. (1995), Strlič et coll. (2015) et Tétreault et coll. (2023) partent du principe que la variable fondamentale est la teneur en humidité, qui dépend à son tour de l'HR, mais uniquement lorsqu'elle est ajustée pour différentes températures. Ensuite, Sebera (1994) et Michalski (2000) supposent que l'HR est le paramètre fondamental. Une différence plus importante, cependant, est le choix de la fonction : certains auteurs utilisent une fonction exponentielle (Reilly et coll., 1995; Strlič et coll., 2015; Tétreault et coll., 2023). D'autres (Michalski,

1993, 2000 et 2002; Sebera, 1994; Erhardt et Mecklenburg, 1995; et Zou et coll., 1996) utilisent une loi de puissance (qui inclut l'utilisation de Sebera de l'indice 1, soit la dépendance linéaire). Dans les modèles utilisant une fonction exponentielle, curieusement, l'hydrolyse se poursuit à une HR de 0 % (c'est-à-dire sans humidité), alors qu'avec une loi de puissance, l'hydrolyse s'arrête en l'absence d'humidité, d'où la divergence rapide des modèles à une HR inférieure à 20 % (ainsi qu'à une HR supérieure à 60 %) dans les graphiques des figures 4 et 5. Comme nous l'avons noté précédemment, cette divergence n'a pas d'incidence pratique, puisque personne ne recommande actuellement la mise en réserve à des pourcentages d'HR aussi faibles (ou à des pourcentages d'humidité élevée), mais elle devient pertinente lorsqu'il s'agit d'expliquer la mesure dans laquelle la faible HR des bâtiments non humidifiés en hiver a profité aux collections d'objets acides dans le passé et pourrait encore le faire à l'avenir.

Bibliographie

Adan, O. C. G., et R. A. Samson (directeurs de publication). *Fundamentals of Mold Growth in Indoor Environments and Strategies for Healthy Living*, Wageningen (Pays-Bas), Wageningen Academic, 2011.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. « Museums, Galleries, Archives, and Libraries », dans *ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications* (sous la direction de M. S. Owen) Atlanta (Géorgie), ASHRAE, 2019, p. 24.1-24.46.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. « Museums, Galleries, Archives, and Libraries », dans *ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications* (sous la direction de M. S. Owen) Atlanta (Géorgie), ASHRAE, 2023, p. 24.1-24.47.

Erhardt, D., et M. F. Mecklenburg. « Accelerated VS Natural Aging: Effect of Aging Conditions on the Aging Process of Cellulose », *Materials Research Society Online Proceedings Library*, vol. 352 (1995), p. 247-270.

Froidevaux, J., et P. Navi. « Aging Law of Spruce Wood », *Wood Material Science & Engineering*, vol. 8, n° 1 (2013), p. 46-52.

Graminski, E. L., E. J. Parks et E. E. Toth. NBSIR 78-1443, [The Effects of Temperature and Moisture on the Accelerated Aging of Paper](#) (format PDF; en anglais seulement), Washington (D.C.), National Bureau of Standards Polymer Division, 1978.

Iraci, J. [Durabilité des CD, des DVD et des disques Blu-ray inscriptibles](#), version révisée, Notes de l'ICC 19/1, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2019.

Michalski, S. « Relative Humidity: A Discussion of Correct/Incorrect Values », dans *ICOM-CC 10th Triennial Meeting, Washington, D.C., 22–27 August 1993: Preprints* (sous la direction de J. Bridgland) Comité pour la conservation du Conseil international des musées, 1993, p. 624-629.

Michalski, S. [*Directives concernant l'humidité et la température dans les archives du Canada*](#), Bulletin technique 23, Ottawa (Ontario), Institut canadien de conservation, 2000.

Michalski, S. « Double the Life for Each Five-Degree Drop, More than Double the Life for Each Halving of Relative Humidity », dans *ICOM-CC 13th Triennial Meeting, Rio de Janeiro, Brazil, 22–27 September 2002: Preprints* (sous la direction de R. Vontobel), London (Royaume-Uni), James & James, 2002, p. 66-72.

Nishimura, D. W. « The Practical Presentation of Research Studies on Film Stability », dans *Research Techniques in Photographic Conservation: Proceedings of the Conference in Copenhagen, 14–19 May 1995* (sous la direction de M. S. Koch), Copenhagen (Danemark), The Royal Danish Academy of Fine Arts, 1996, p. 85-92.

Nishimura, D. W. [*Understanding Preservation Metrics*](#) (format PDF; en anglais seulement), Rochester (New York), Image Permanence Institute/Rochester Institute of Technology, 2018.

Organisation internationale de normalisation. ISO 18934:2011, *Matériaux pour l'image – Archives multimédia – Environnement de stockage*, Genève (Suisse), Organisation internationale de normalisation, 2011.

Reilly, J. M., D. W. Nishimura et E. Zinn. *New Tools for Preservation: Assessing Long-Term Environmental Effects on Library and Archives Collections*, Washington (D.C.), Commission on Preservation and Access, 1995.

Sebera, D. K. [*Isoperms: An Environmental Management Tool*](#) (en anglais seulement), Washington (D.C.), Commission on Preservation and Access, 1994.

Sedlbauer, K. [*Prediction of Mould Fungus Formation on the Surface of and Inside Building Components*](#) (format PDF; en anglais seulement), *Fraunhofer Institute for Building Physics* (2001), p. 75-141.

Snow, D. « The Germination of Mould Spores at Controlled Humidities », *Annals of Applied Biology*, vol. 36, n° 1 (1949), p. 113.

Snow, D., M. H. G. Crichton et N. C. Wright. « Mould Deterioration of Feeding-Stuffs in Relation to Humidity of Storage: Part I. The Growth of Moulds at Low Humidities », *Annals of Applied Biology*, vol. 31, n° 2 (1944), p. 102-110.

Strang, T. *Studies in Pest Control for Cultural Property*, thèse de doctorat, Université de Gothenburg, 2012.

Strlič, M., et coll. « Damage Function for Historic Paper. Part III: Isochrones and Demography of Collections », *Heritage Science*, vol. 3, n° 1 (2015), p. 1-11.

Tétreault, J., D. Vedoy, P. Bégin, S. Paris Lacombe et A.-L. Dupont. « Modelling the Degradation of Acidic and Alkaline Printing Paper », *Cellulose*, vol. 30, n° 17 (novembre 2023), p. 11157-11175.

Zou, X., T. Uesaka et N. Gurnagul. « [Prediction of Paper Permanence by Accelerated Aging I. Kinetic Analysis of the Aging Process](#) » (en anglais seulement), *Cellulose*, vol. 3 (1996), p. 243-267.

Glossaire des lignes directrices sur le climat

climat

La température et l'humidité relative (HR) de l'air. Lorsque ce terme est utilisé dans le contexte d'un musée ou des archives, il peut faire référence aux comportements à long terme et à court terme de la température et de l'HR.

Remarque : De manière plus générale, le terme fait habituellement référence aux tendances à long terme associées au temps qu'il fait à l'extérieur.

Consulter également : environnement

contenant dans lequel on trouve un microclimat

Contenant de protection conçu pour maintenir un microclimat particulier. Il est généralement conçu pour stabiliser l'humidité relative, mais il peut aussi être conçu pour réduire les variations de température, comme dans le cas des caisses d'expédition.

contenant dans lequel on trouve un microenvironnement

Contenant de protection conçu pour maintenir un microenvironnement particulier. Il peut être conçu pour limiter un ou plusieurs des agents de détérioration.

contenant de protection

Barrière physique qui entoure un ou des objets. Il peut s'agir d'un sac, d'une boîte, d'une vitrine d'exposition, d'une armoire de rangement, d'une caisse d'expédition, etc.

Remarque : Aux fins de la présente ressource, un contenant de protection bloque une partie ou la totalité des agents de détérioration (par exemple, les forces physiques, l'eau, les polluants et l'HR inadéquate).

contrôle du climat

Le maintien d'une température et d'une humidité relative particulières à l'intérieur d'un bâtiment, d'une pièce ou d'un contenant de protection à l'aide de machines (contrôle actif du climat) ou de tampons d'humidité et de matériaux d'isolation (contrôle passif du climat).

déliquescence

Formation d'une solution par certains sels particuliers qui absorbent l'humidité de l'air lorsque l'HR dépasse une valeur critique.

Remarque : Par exemple, le sel ordinaire (NaCl) est déliquescent lorsque l'HR est égale ou supérieure à 75 %.

durée de vie

Le temps (généralement en années) nécessaire à un objet pour se détériorer jusqu'à un état où il n'a plus de valeur ou d'utilité pour un établissement.

Remarque : Par exemple, le temps nécessaire pour qu'un support numérique devienne illisible ou le temps qu'il faut à un document d'archives pour devenir trop fragile pour être manipulé facilement. Pour en savoir plus, consulter [Explication des calculateurs de moisissures et de durée de vie – La notion de durée de vie des objets](#).

environnement

Toutes les conditions qui entourent et influencent un objet.

Remarque : Aux fins de la présente ressource, cela inclut les agents de détérioration (par exemple, les forces physiques, l'eau, les polluants, la lumière, les ultraviolets ainsi qu'une température et une HR inadéquates).

Consulter également : climat

gestion des risques

Processus au sein d'un établissement qui a pour objectif de minimiser les risques les plus importants qu'encourent ses collections.

Remarque : La gestion des risques ne vise pas à traiter tous les risques.

Remarque : Pour en savoir plus, consulter [La méthode ABC pour appliquer la gestion des risques à la préservation des biens culturels](#).

humidité absolue

Mesure de l'humidité basée sur le poids de la vapeur d'eau par volume unitaire d'air. À 20 °C, l'humidité absolue d'un milieu à 100 % d'HR est de 17,3 g/m³.

Remarque : Cette mesure de l'humidité est utile aux ingénieurs qui conçoivent des systèmes mécaniques, mais elle ne l'est pas pour prédire la teneur en humidité des objets d'une collection.

Consulter également : humidité relative (HR)

humidité relative (HR)

Rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau et de la pression de la vapeur d'eau saturée à la même température. L'HR peut aussi être exprimée comme le rapport de la concentration de la vapeur d'eau et de la concentration de saturation de la vapeur d'eau à la même température.

Remarque : Contrairement à l'humidité absolue, l'HR est la mesure de l'humidité qui présente une bonne corrélation avec la teneur en humidité des objets, ainsi qu'avec le taux de croissance des moisissures et avec notre propre perception de l'humidité et de la sécheresse.

Remarque : L'HR est exprimée en pourcentage.

Consulter également : humidité absolue

microclimat

Climat local dans une petite région de l'espace. On peut créer volontairement un microclimat en utilisant un contenant de protection, qui contrôle généralement l'HR, mais qui peut parfois aussi contrôler la température.

Remarque : Un microclimat peut également apparaître naturellement, sans avoir de frontières précises. Par exemple, l'air situé à quelques centimètres d'un plancher froid a une HR beaucoup plus élevée que la majorité de la pièce et est souvent à l'origine de la formation de moisissures locales.

microenvironnement

Environnement local dans une petite région de l'espace entourant un objet. On peut créer volontairement un microenvironnement en utilisant un contenant de protection afin de contrôler plusieurs agents de détérioration.

Remarque : Un microenvironnement peut également apparaître naturellement, sans avoir de frontières précises. Par exemple, l'air situé à quelques millimètres de tout matériau qui émet des composés organiques volatils polluera un objet adjacent.

sensibilité

Réaction d'un matériau ou d'un objet à une dose d'un agent extérieur, mesurée comme un rapport entre la réaction et la dose.



Remarque : Par exemple, le nombre de fissures causées dans un objet par un certain nombre de variations d'humidité relative d'une certaine ampleur et la taille de ces fissures, ou le degré de décoloration d'une couleur après exposition à une certaine quantité de lumière.

Consulter également : vulnérabilité

variation démontrée

La plus grande variation de l'HR qu'un objet ou une collection a connue dans le passé. Il s'agit d'un paramètre clé dans les décisions de contrôle du climat durable, car les variations futures inférieures à la variation démontrée ont une très faible probabilité de causer de nouvelles fissures importantes.

Remarque : Dans la situation la plus courante au Canada, où la moyenne annuelle de l'HR est modérée et où le plus grand risque pour les collections en raison des variations se produit en hiver, lorsque l'HR est faible, il s'agit de l'HR la plus faible des hivers passés.

Remarque : Pour obtenir une discussion plus approfondie des améliorations apportées à son application à la gestion des risques liés aux collections et aux décisions relatives au contrôle du climat, consulter [Aperçu des lignes directrices sur le climat – Annexe B : Sensibilité aux variations et application des variations démontrées](#).

vulnérabilité

Terme employé dans divers domaines de la gestion des risques (et des catastrophes) pour désigner la susceptibilité d'un établissement ou d'une communauté à un danger. Il s'agit d'une évaluation complexe qui prend en compte non seulement les effets directs sur les objets et les personnes, mais aussi la perte de valeur possible causée par ces effets, en tenant compte des facteurs d'atténuation de la résilience de l'établissement et de la communauté.

Consulter également : sensibilité

© Gouvernement du Canada, Institut canadien de conservation, 2025

Publié par :

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

N° de catalogue : CH57-4/83-2025F-PDF
ISBN 978-0-660-75637-0