

DIRECTION DES ARCHIVES DE FRANCE

**CLIMAT DES MAGASINS D'ARCHIVES :
OBJECTIFS, MOYENS, MÉTHODES**

*Petit manuel de climatologie appliquée
à la conception des bâtiments d'archives*

PIERRE DIAZ PEDREGAL

2009

TABLE DES MATIÈRES

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	3
<i>TABLE DES FIGURES</i>	6
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	8
MODE D'EMPLOI DU MANUEL	9
INTRODUCTION	11
CHAPITRE 1	13
ARCHIVES : INFORMATION ET MATIÈRE.....	13
LA FACE CACHÉE DU PAPIER.....	14
INTERACTION AVEC LE CLIMAT	16
QUELQUES CHIFFRES SIGNIFICATIFS	17
CHAPITRE 2	21
INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA DURÉE DE VIE DU PAPIER	21
INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ RELATIVE SUR LA DURÉE DE VIE DU PAPIER	25
UN FACTEUR FONDAMENTAL : LA STABILITÉ CLIMATIQUE	26
LES RISQUES BIOLOGIQUES ASSOCIÉS AU CLIMAT	28
LE CONTRÔLE DU CLIMAT PERMET D'ACCROÎTRE LA DURÉE DE VIE DES ARCHIVES.....	30
RECOMMANDATIONS EN MATIÈRE DE CLIMAT INTÉRIEUR	33
CHAPITRE 3	41
LE CLIMAT EXTÉRIEUR	41
INFLUENCE DES FACTEURS ARCHITECTURAUX SUR LE CLIMAT INTÉRIEUR	47
FAUT-IL PRÉVOIR DES BAIES VITRÉES DANS LES MAGASINS ?.....	52
<i>L'éclairage naturel est-il indispensable ?</i>	53
<i>Une ventilation naturelle de secours est-elle nécessaire ?</i>	54
<i>Un ouvrant est-il justifié pour assainir un magasin inondé ?</i>	55
<i>L'éclairage naturel a-t-il un impact favorable en matière de protection biologique ?</i>	56
<i>Impact économique d'une baie vitrée</i>	58
<i>Impact en matière de stabilité thermique et hydrique</i>	59
<i>Impact du point de vue photochimique</i>	59
<i>Ouvrir ou ne pas ouvrir ?</i>	60
INFLUENCE DES COLLECTIONS.....	61

<i>Le rôle des conditionnements</i>	62
INFLUENCE DES FACTEURS D'OCCUPATION ET DES ÉQUIPEMENTS TECHNIQUES	64
<i>Influence de l'occupation humaine</i>	65
<i>Influence de l'éclairage artificiel</i>	66
<i>Influence des équipements de chauffage et/ou climatisation et de la ventilation</i>	66
CHAPITRE 4	69
FAUT-IL CLIMATISER ?	69
<i>Les exigences climatiques intérieures</i>	71
<i>L'étude du climat extérieur</i>	72
<i>La définition architecturale du bâtiment d'archives</i>	76
CHOIX TECHNOLOGIQUES.....	79
<i>Chauffage seul</i>	80
<i>Chauffage hivernal et rafraîchissement estival</i>	81
<i>Climatisation</i>	82
<i>Que faut-il penser des appareils mobiles pour l'humidification et la déshumidification ?</i> ...	85
LA QUESTION DU RENOUVELLEMENT D' AIR	88
<i>Quel taux d'air neuf faut-il prévoir ?</i>	91
<i>Nécessité d'une filtration</i>	93
LA QUESTION DE LA DIFFUSION DE L' AIR DANS LES MAGASINS	95
<i>Choix du taux de brassage</i>	96
<i>Intérêt de la surpression</i>	97
LE CAS DES ARCHIVES PHOTOGRAPHIQUES	98
QUE FAIRE DANS LES LOCAUX AUTRES QUE LES MAGASINS ?.....	100
TRAITEMENT CLIMATIQUE DES ARCHIVES ET « DÉVELOPPEMENT DURABLE ».....	102
CHAPITRE 5	105
LA COMPLEXITÉ D'UN PROJET : UNE RÉALITÉ INCONTOURNABLE.....	106
<i>Complexité des objectifs à atteindre</i>	107
<i>Complexité de l'environnement administratif des projets</i>	108
<i>Complexité des études et de la réalisation</i>	108
LES POINTS CLÉS À CHAQUE ÉTAPE DU DÉVELOPPEMENT DU PROJET.....	109
<i>Lors des études préalables</i>	111
<i>Lors de la phase de programmation</i>	112
<i>Lors de l'avant-projet sommaire</i>	114
<i>Lors de l'avant-projet définitif</i>	114
<i>Lors de la préparation du dossier de consultation des entreprises</i>	116
<i>Pendant le chantier</i>	117
<i>Après la réception</i>	117

APRÈS LE PROJET, LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE	118
LE SUIVI DU CLIMAT : UNE RESPONSABILITÉ DU CONSERVATEUR.....	120
EN GUISE DE CONCLUSION	123
ANNEXES.....	127
LE COMPORTEMENT THERMOHYGROMÉTRIQUE DU PAPIER	129
COMPARAISON D'UNE SOLlicitATION CLIMATIQUE ET DE LA RÉPONSE D'UN BÂTIMENT	135
CONDITIONS CLIMATIQUES RECOMMANDÉES PAR LA NORME ISO 11799:2003	139
EXEMPLE DE PROTOCOLE DE RÉCEPTION DES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS UN MAGASIN DE CONSERVATION D'ARCHIVES	141
DÉFINITIONS DE QUELQUES NOTIONS FONDAMENTALES	147
PRINCIPALES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	157
REMERCIEMENTS	159

TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Un papetier au xvi ^e siècle. Extrait de P. Lacroix, E. Fournier et F. Seré, <i>Histoire de l'imprimerie et des arts et professions qui se rattachent à la typographie</i> , A. Delahays, s. d. (xix ^e siècle).	15
Figure 2 – Accroissement relatif de la cinétique chimique d'une réaction en application de la loi d'Arrhénius pour une énergie d'activation de 100 kJ/mol.	24
Figure 3 – Seuil de développement de quelques micro-organismes en fonction de la température sèche et de l'humidité relative.	30
Figure 4 – Courbes isopermes pour une enthalpie d'activation de 100 kJ/mol d'après une équation de D. K. Sebera.	31
Figure 5 – Comparaison d'une stratégie à consignes climatiques constantes et à consignes climatiques variables en fonction de la saison.	37
Figure 6 – Espace psychrométrique recommandé par la DAF avec rappel des valeurs préconisées naguère par M. Duchein. En surimpression les valeurs climatiques extérieures moyennes mensuelles de Trappes (région parisienne) sont représentées.	38
Figure 7 – Schéma relationnel entre les paramètres climatiques extérieurs et intérieurs, le bâtiment et les collections.	42
Figure 8 – Conditions extérieures (données horaires) pour Strasbourg avec indication des points de référence habituellement utilisés par les maîtres d'œuvre.	44
Figure 9 – Flux solaire à Strasbourg.	45
Figure 10 – Flux solaire à Strasbourg pendant le printemps.	45
Figure 11 – Comparaison des températures intérieures et extérieures dans un centre d'archives parisien.	47
Figure 12 – Schéma relationnel entre les sollicitations climatiques extérieures et la réponse d'un bâtiment à cette sollicitation.	49
Figure 13 – Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs calculées de la température intérieure d'un centre d'archives à Paris.	50
Figure 14 – Comparaison des données climatiques intérieures de deux centres d'archives.	61
Figure 15 – Évolution de la température dans et hors la boîte.	63
Figure 16 – Évolution de l'humidité relative dans et hors la boîte.	64
Figure 17 – Schéma de principe d'une régulation.	67
Figure 18 – Fréquences classées et fréquences cumulées de la température moyenne quotidienne pour Strasbourg exprimées en jours (source Météonorm).	74

Figure 19 – Comparaison des valeurs du rapport de mélange entre l'intérieur et l'extérieur dans un magasin d'archives à Paris pendant une année.	75
Figure 20 – Représentation d'un processus de chauffage sur un diagramme psychrométrique.	80
Figure 21 – Représentation d'un processus de rafraîchissement sur un diagramme psychrométrique.	82
Figure 22 – Hiérarchie fonctionnelle d'un système de climatisation.	83
Figure 23 – Représentation d'un processus d'humidification par évaporation sur un diagramme psychrométrique.	86
Figure 24 – Représentation d'un processus de déshumidification sur un diagramme psychrométrique.	88
Figure 25 – Schéma de principe du traitement d'air d'un local.	89
Figure 26 – Exemple de traitement aéraulique d'un magasin par une armoire de climatisation. La quantité d'air neuf injecté n'est pas reprise, induisant une mise en surpression du magasin. ...	98
Figure 27 – Constitué d'un grand nombre de composants connectés par de multiples liaisons, un circuit électronique illustre bien ce qu'on appelle ordinairement la complexité. Mais on devine qu'une logique rigoureuse se cache derrière ce désordre apparent (doc. dr).	106
Figure 28 – Évolution de la masse d'une feuille de papier A4.	129
Figure 29 – Représentation du résultat des pesées de la feuille de papier en fonction de l'humidité relative du laboratoire.	130
Figure 30 – Isothermes d'adsorption du papier calculées pour trois températures.	131
Figure 31 – Évolution de la température et de l'humidité relative dans une vitrine étanche abritant une ramette de 500 feuilles A4.	133
Figure 32 – Spectre fréquentiel de la température extérieure.	137
Figure 33 – Spectre fréquentiel de la température intérieure.	137
Figure 34 – Structure chimique de la cellulose mettant en évidence les trois fonctions hydroxyles greffées sur le motif principal.	148
Figure 35 – L'humidité relative est une grandeur dépendante à la fois de la température et de la pression de vapeur de l'air humide.	150
Figure 36 – Schéma des liaisons hydrogène entre molécules d'eau.	152

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Conditions climatiques recommandées par la Direction du livre et de la lecture en 1998.	35
Tableau 2 – Extrait partiel des recommandations de la norme NF ISO 11799:2003.	35
Tableau 3 – Statistiques sur les écarts journaliers constatés de l’humidité relative dans et hors la boîte.	64
Tableau 4 – Extrait de l’annexe B (informative) de la norme ISO 11799:2003.	140

MODE D'EMPLOI DU MANUEL

Ce manuel a été conçu comme un outil de travail. Il n'est donc sans doute pas inutile d'en proposer un mode d'emploi.

- À l'instar de n'importe quel ouvrage, celui-ci peut être simplement *feuilleté*. À ceux, plus exigeants, qui envisagent de le *lire* complètement, il est suggéré de consulter préalablement la table des matières (page 3). Les titres des chapitres et des sous-chapitres ont été choisis afin d'explicitier le mieux possible le contenu effectif de l'ouvrage.
- Comme dans tout exposé à caractère didactique, des notions importantes, sinon essentielles, sont décrites dès l'introduction. Il serait dommage de ne pas en avoir pris connaissance avant d'aborder l'examen des thèmes traités à la suite.
- Pour alléger l'exposé principal, un certain nombre de sujets sont développés dans des annexes spécifiques. Le cas échéant, le lecteur y est renvoyé à l'aide de mentions figurant dans le corps du texte sous la forme suivante : (→ LE COMPORTEMENT THERMOHYGROMÉTRIQUE DU PAPIER).
- Certains termes, usuels ou non, nécessitent des définitions détaillées. Elles figurent parfois en note de bas de page. Lorsque ces termes ou expressions nécessitent de plus larges développements, les définitions sont renvoyées dans un lexique situé à la fin de l'ouvrage. Les termes concernés sont alors suivis par une mention entre parenthèses telle que : (→ LEXIQUE). Pour ne pas alourdir la typographie du texte, ce renvoi n'est pas systématique. Il est proposé à la première occurrence du terme. Il est parfois répété lorsqu'il réapparaît dans un chapitre ultérieur.
- Pour ne pas être confondu avec les exposants numériques, les appels de note sont soulignés de la manière suivante : exemple¹.

¹ Texte de la note.

- Les principales références bibliographiques figurent en annexe. Elles sont mentionnées dans le texte entre crochets et reprennent le nom du premier auteur et l'année de parution comme dans l'exemple suivant : [DUCHEIN, 1985]. Les références complémentaires sont seulement mentionnées en note.

Introduction

Climat des archives

Quelles conditions climatiques doit-on assurer dans un magasin d'archives pour garantir une bonne conservation des fonds et des collections ? La question est aisée à poser. En revanche, y répondre est loin d'être simple. L'origine de cette difficulté réside dans le nombre et l'hétérogénéité des critères de décision. Il n'est donc pas étonnant que les réponses aient pu varier dans le temps et dans l'espace.

La tentation est grande de chercher des normes dont le respect suffirait à régler les problèmes. Mais l'expérience montre que la réponse à des problèmes complexes par la simple application de recettes ne résout rien et peut conduire, dans certains cas, à compromettre l'intégrité physique des collections. De nombreux et récents sinistres ont malheureusement prouvé cette réalité.

L'objectif de cet ouvrage est de guider les divers participants à un projet de construction ou de réhabilitation d'archives, dans l'élaboration de leur réflexion relative aux conditions climatiques à maintenir dans les magasins. Cette démarche suppose de revenir aux fondamentaux qui doivent sous-tendre les décisions à prendre. Ce petit manuel de climatologie appliquée propose donc délibérément une approche didactique : comprendre pour agir. Il semble impossible de définir correctement les conditions de conservation des archives si leur comportement thermohygrométrique n'est pas connu. De même, comment contrôler le climat d'un bâtiment si ses réactions aux fluctuations climatiques extérieures ne sont pas comprises ?

Ainsi se dessine le plan de ce livre. Après avoir étudié les propriétés singulières du papier, matériau dominant dans les archives (chapitre 1), le rôle du climat en tant que facteur de conservation sera défini (chapitre 2). Ensuite, c'est la fonction protectrice du bâtiment abritant les archives qui sera étudiée (chapitre 3). Il sera temps alors de répondre à la question récurrente : faut-il climatiser les magasins (chapitre 4) ? Le chapitre 5 proposera

une série de recommandations utiles à la conduite de projet avant de conclure sur la nécessité d'une concertation permanente imposant une gestion efficace de l'information pendant toute la durée du projet.

Comme il a été précisé dans le « Mode d'emploi de l'ouvrage », plusieurs annexes proposent des compléments d'information. Les c qui suivent y feront régulièrement référence.

Chapitre 1

Au cœur des archives, le papier

Archives : information et matière

L'Histoire commence avec l'écriture et avec elle, celle de son support. Pierre, tablette d'argile, papyrus, parchemin, papier, bande magnétique, disque informatique : en voici nommés quelques-uns parmi de nombreux autres. Qu'ont-ils en commun ? Au cours des millénaires, ils ont été choisis pour leur disponibilité et pour leur commodité à recevoir et transmettre des prières, des légendes, des fables, des récits, des rapports, des comptes, ... Faits de matières plus ou moins pérennes, ils sont le support des images, ô combien variées dans l'espace et le temps, de ce qu'il y a de plus immatériel, les expressions plurielles de la pensée humaine. Loin de cette dimension proprement patrimoniale des documents d'archives, ce modeste ouvrage se consacrera à leur seule matérialité physico-chimique et, plus particulièrement, à leur environnement climatique en relation avec leur conservation.

Quelles sortes de matériaux trouve-t-on aujourd'hui dans un magasin d'archives ? S'il fallait être exhaustif, l'énumération obtenue serait étonnamment longue. Aux matériaux supports déjà cités, il faudrait ajouter le métal constituant par exemple les fermoirs de manuscrits, le bois et le cuir présents dans la couverture d'anciens ouvrages, divers textiles ayant servi à façonner des sangles ou des entoilages de reliures, plusieurs sortes de cartonnages ou matériaux plastiques mis en forme pour réaliser des boîtes d'archives, sans oublier la cire, les encres, les adhésifs...

Chacun de ces matériaux possède ses propres caractéristiques physiques et chimiques. Il serait donc vain d'entreprendre la conception d'un bâtiment d'archives en voulant tenir compte des spécificités matérielles précises de tel ou tel corpus particulier de documents. La seule option réaliste est de considérer les archives comme des ensembles

homogènes. Un facteur important permettra de valider cette approche pragmatique : si les matériaux présents dans des archives sont d'une grande variété, le papier est, sans l'ombre d'un doute, la substance dominante. Mais il y a papier et papier. Honoré de Balzac qui, en marge de son activité d'écrivain, fut aussi, le temps de se ruiner, éditeur et imprimeur, le rappelle à sa manière :

« Le papier, produit non moins merveilleux que l'impression à laquelle il sert de base, existait depuis longtemps en Chine quand, par les filières souterraines du commerce, il parvint dans l'Asie Mineure, où, vers l'an 750, selon quelques traditions, on faisait usage d'un papier de coton broyé et réduit en bouillie. La nécessité de remplacer le parchemin, dont le prix était excessif, fit trouver, par une imitation du *papier bombycien* (tel fut le nom du papier de coton en Orient), le papier de chiffon, les uns disent à Bâle, en 1170, par des Grecs réfugiés ; les autres disent à Padoue, en 1301, par un Italien nommé Pax². »

Lorsqu'il écrit ce texte en 1836, Balzac ignorait que Friedrich Keller, un tisserand de Saxe, déposerait quelques années plus tard, en 1844, le premier brevet pour la fabrication à l'aide d'une meule, d'une pâte à papier à base de bois. Avant la fin du XIX^e siècle, la pâte mécanique sera améliorée par des procédés chimiques permettant de ne conserver que les fibres cellulosiques du bois³.

Qu'il soit de chiffon ou issu de fibres végétales, le papier présente des caractéristiques communes dont la connaissance est nécessaire à qui se préoccupe de sa bonne conservation.

La face cachée du papier

Le papier n'est pas un matériau ordinaire. Sa première caractéristique est d'être une substance organique (→ LEXIQUE). Les différentes espèces de bois sont des substances organiques *naturelles* dont la mise en œuvre pour satisfaire nos besoins en matériaux, ne

² H. de Balzac. – *Illusions perdues*, Omnibus, Paris, 2007, p. 641.

³ Les pâtes dites « mécaniques » contiennent non seulement la cellulose mais aussi l'hémicellulose et la lignine du bois. Ce dernier composant est un polymère très complexe particulièrement sensible à la photo-oxydation. C'est notamment la lignine qui est responsable du jaunissement du papier. Les pâtes dites « chimiques » ont subi un traitement *ad hoc* qui permet de ne retenir que les fibres de cellulose.

nécessite que de simples opérations de débitage et de façonnage. À l'inverse, on peut disposer de matériaux organiques totalement *artificiels* – tels l'immense famille des plastiques – dont la fabrication repose notamment sur une pétrochimie lourde. Les diverses sortes de papiers forment une grande classe de matériaux intermédiaires. Ils peuvent être définis très généralement comme des substances *artificielles* élaborées à partir de fibres organiques *naturelles* où domine la cellulose (→ LEXIQUE). Tel est le premier paradoxe du papier, tout à la fois produit de la nature et de la technologie.

Autre paradoxe : si sa fabrication est toujours possible en s'appuyant sur les techniques ancestrales (→ **Figure 1**) auxquelles ont encore recours quelques artisans spécialisés, l'industrie moderne fait appel à des machines capables de fabriquer en continu du papier sur une largeur de 10 mètres à la vitesse impressionnante de 30 mètres par seconde, et dont le coût unitaire dépasse le milliard d'euros⁴ !



Figure 1 – Un papetier au XVI^e siècle. Extrait de P. Lacroix, E. Fournier et F. Seré, *Histoire de l'imprimerie et des arts et professions qui se rattachent à la typographie*, A. Delahays, s. d. (XIX^e siècle).

Le dernier paradoxe que réserve le papier n'est pas forcément le moindre. Ce matériau dont la résistance mécanique est somme toute assez faible (il se froisse et se déchire facilement), dont la cohésion interne des fibres n'est due qu'aux interactions

⁴ Pour donner un sens à un chiffre aussi élevé, rappelons qu'un Airbus A320 ne coûte que 50 millions d'euros. Une machine à papier moderne coûte donc l'équivalent d'une flotte de vingt Airbus...

électrostatiques des liaisons hydrogène (→ LEXIQUE), est capable de traverser les siècles, se révélant ainsi étonnamment durable, s'il est correctement fabriqué et conservé dans de bonnes conditions.

S'il n'est pas le seul critère important, le climat entourant un ensemble d'archives représente sans aucun doute l'un des facteurs déterminant de sa longévité. La raison doit être cherchée dans la nature même du papier.

De par sa structure poreuse, de par la nature chimique de ses fibres, le papier apparaît comme l'archétype des matériaux hygroscopiques, c'est-à-dire des substances capables d'*adsorber* (→ LEXIQUE) de la vapeur d'eau puis de la restituer à l'ambiance dans laquelle elles sont placées en fonction des variations du contenu en eau de l'air. Cette caractéristique fondamentale du papier (mais aussi du parchemin, du cuir, du carton, etc.) est au cœur de l'explication du comportement singulier des documents en regard des variations climatiques de leur environnement, et plus particulièrement des fluctuations de l'humidité de l'air.

Interaction avec le climat

Toute substance matérielle placée dans une ambiance va chercher à se mettre en équilibre thermique avec cette dernière de telle sorte qu'après un certain temps, les températures de la substance et de l'ambiance soient identiques. À ce jour, aucune expérience scientifique n'a jamais contredit ce principe fondamental et universel de la thermodynamique. Pour les substances hygroscopiques, un processus complémentaire se manifeste. Il concerne l'équilibre hydrique. Un matériau hygroscopique peut contenir une certaine quantité de vapeur d'eau. Ce contenu en eau est cependant variable et cette variabilité est dépendante à la fois de la température et de l'humidité relative de l'ambiance (→ LEXIQUE). Le processus d'échange permanent de vapeur d'eau entre la substance et son environnement est très complexe. Une description simplifiée en est proposée dans l'annexe « COMPORTEMENT THERMOHYGROMÉTRIQUE DU PAPIER », page 129.

La plage d'humidité relative généralement observée dans les magasins d'archives existants est comprise entre 25 et 65 % tandis que la température le plus souvent fluctue entre 16 et 23 °C. Avec de telles conditions climatiques, le contenu en eau du papier varie approximativement de 4 % à 8 %, soit un doublement ! On observera que sur cette plage,

la variation est quasiment linéaire avec une pente positive égale à 1 % de contenu en eau pour une variation de 10 % de l'humidité relative.

Quelques chiffres significatifs

Les chiffres manquent singulièrement de poésie. La vocation pratique de cet ouvrage impose pourtant d'en manipuler un certain nombre et même, parfois, de retenir les plus significatifs ! Ils permettront de mieux situer les questions posées et les enjeux.

Le premier chiffre sera celui d'une surface. Pour des raisons de sécurité contre l'incendie, la réglementation impose que les magasins de conservation ne dépassent pas une superficie de 200 m². Cette valeur sera retenue pour définir une unité-type de conservation. Il sera aisé de raisonner sur une telle unité afin de fixer des ordres de grandeur réalistes. Lorsque cela sera nécessaire, il suffira d'extrapoler les données obtenues sur l'unité-type au nombre de magasins requis dans le bâtiment d'archives pour obtenir les grandeurs globales souhaitées.

Si l'on fixe sa hauteur sous plafond à 2,5 m, l'unité-type définie précédemment présentera un volume de 500 m³. Le linéaire de rangement d'une telle unité sera d'environ 1 300 mètres linéaires⁵ si elle est équipée de rayonnages fixes, et de 2 000 mètres linéaires s'il s'agit de rayonnages mobiles.

Il n'est pas inutile d'indiquer dès maintenant le tonnage d'archives que représente un tel magasin type. En formulant l'hypothèse raisonnable d'une charge moyenne de 50 kg par

⁵ Le « mètre linéaire » est l'unité de base du comput archivistique. Cette unité est notée « ml » en abrégé et le plus souvent « kml » pour « kilomètre linéaire ». À l'évidence, cette unité n'est pas parfaite. Imaginons une travée de rayonnage d'une longueur d'un mètre comportant six étagères. Cette travée comptera pour 6 ml d'archives. Si elle ne comporte que quatre étagères destinées à recevoir des registres de plus grande hauteur que des boîtes, la même travée ne comptera que pour 4 ml alors même que son occupation au sol (circulation incluse) sera la même. On ne peut donc établir de relation directe et précise entre le linéaire de rayonnage et la surface d'archives. Cependant, ce « flou » inévitable n'est pas pénalisant dans la problématique de caractérisation du climat, objet de cet ouvrage.

mètre linéaire d'étagère⁶, on trouve une masse totale de 65 tonnes à 100 tonnes d'archives selon le type de rayonnage retenu.

Comme indiqué précédemment, le volume du magasin-type est de 500 m³, ce qui implique que le volume d'air qu'il contient est voisin⁷ de 450 m³. Aux conditions énoncées plus haut (température égale à 20 °C et humidité relative de 50 %), l'air du local est un mélange gazeux contenant 8,65 g de vapeur d'eau par mètre cube⁸, soit un total d'un peu moins de 4 kg d'eau pour tout le magasin. Cette valeur peut sembler *a priori* importante. De fait, elle est négligeable vis-à-vis du contenu en eau des archives proprement dite. En effet, à une température de 20 °C et à une humidité relative de 50 %, le contenu en eau du papier supposé à l'équilibre avec son environnement, est de 63 grammes par kilogramme de papier (→ Les isothermes d'adsorption du papier sont représentées sur la **Figure 30**, page 131). À l'échelle d'un magasin-type dont on suppose qu'il abrite 65 tonnes d'archives, le contenu en eau total des collections s'élève donc à plus de 4 tonnes d'eau !

Le ratio entre l'eau contenue dans l'air et celle contenue dans le papier s'avère très éclairant : il est pratiquement de un pour mille ! Autrement dit, il y a mille fois plus d'eau dans les documents archivés que dans l'air du local... Cette situation constitue le point clé du comportement d'un local d'archive sur le plan hydrique. Bon nombre des déboires qui affectent des locaux de conservation d'archives résultent d'une méconnaissance de ce ratio fondamental. Toute initiative visant à modifier ou contrôler l'évolution du climat intérieur d'un magasin de conservation devra impérativement tenir compte de cette réalité absolument incontournable.

⁶ Pour des étagères pleines, la charge varie de 25 kg/ml pour des petits ouvrages à 100 kg/ml pour des grands registres. La valeur moyenne retenue coïncide avec celle que propose [DUCHEIN, 1985, p. 147]. Des études récentes commandées par la Direction des Archives de France à SOCOTEC et SODEG INGÉNIEURIE pour réévaluer la charge d'exploitation à prendre en compte dans les magasins d'archives, confirment ces ordres de grandeur (Voir note de la DAF, réf. DITN-RES-2004-001).

⁷ Il faudrait, en toute rigueur, déterminer le volume effectif occupé par le mobilier et les fonds d'archives et déduire la valeur trouvée du volume brut du local. Le résultat ne serait sans doute pas très loin de l'estimation proposée et changerait fort peu les conclusions.

⁸ Cette valeur peut être calculée ou, plus simplement, lue sur un *diagramme psychrométrique* (→ LEXIQUE).

Une question est souvent posée : l'inertie thermique et hydrique des parois ne joue-t-elle donc aucun rôle ? Pour y répondre, il convient, une fois de plus, de se référer à quelques chiffres. Voyons d'abord ce qu'il en est pour l'inertie thermique. Un local d'archives présente une surface de 550 m² de parois intérieures, la plupart du temps en béton dans les bâtiments récents. On peut évaluer l'inertie thermique du local en prenant en compte ces parois pour la moitié de leur épaisseur². Si on suppose que celle-ci est égale à 20 cm, le volume de béton contribuant à l'inertie thermique pour un magasin donné peut être évalué à 55 m³, soit une masse d'environ 125 tonnes, un chiffre voisin de celui des archives. Cette comparaison mène à une nouvelle information importante : du point de vue thermique, l'inertie des parois est du même ordre de grandeur que celle des archives, une situation bien différente de ce qui se passe du point de vue hydrique comme nous allons le voir.

Dans l'absolu, force est d'admettre que les parois jouent un rôle hydrique. En effet, leur porosité, qui n'est pas nulle. Elle leur confère la possibilité de stocker de la vapeur d'eau. Mais cette participation est infiniment plus modeste que celle des matériaux constitutifs des archives. Plusieurs raisons peuvent être invoquées : la surface d'échange des parois des magasins est en définitive beaucoup plus faible que celle des documents d'archives ; la capacité d'adsorption du béton est nettement plus modeste également ; enfin, les surfaces de béton ne devant pas être laissées brutes, les revêtements de surface (peinture, enduit, bouche-pore, résine, etc.) réduisent très sensiblement les capacités d'échange de vapeur d'eau entre l'air et le béton, alors qu'elles affectent fort peu ses propriétés thermiques. Aussi, la plupart du temps, l'inertie hydrique des parois peut être négligée en regard de celle des documents conservés dans les magasins.

Le problème central posé à ceux qui doivent définir, à quelque degré que ce soit, les conditions environnementales dans lesquelles doivent être conservées les archives, sera de tenir compte des singularités mentionnées contribuant à différencier de manière radicale un magasin d'archives d'un espace patrimonial tel qu'un local de réserve dans un musée. Mais avant d'étudier les moyens pratiques de contrôler le climat intérieur d'un magasin d'archives, il faudra mieux comprendre comment la température et l'humidité relative affectent la durée de vie des documents qui y sont conservés.

² L'autre moitié du mur participe à l'inertie thermique du local adjacent.

Chapitre 2

Quel rôle joue le climat intérieur dans la conservation des documents ?

Influence de la température sur la durée de vie du papier

Température : voilà un mot d'une grande banalité. Tout le monde le connaît. Chacun dispose chez lui d'au moins un thermomètre et sait que cet instrument permet de mesurer la température. Mais qui saurait définir exactement ce qu'est la température, ce qu'elle représente réellement ? Qu'en dit le *Petit Robert* ? La définition courante qu'il propose n'est pas très éclairante aux yeux d'un physicien : « *Degré de chaleur ou de froid de l'atmosphère, d'une substance*¹⁰. » Il faut aller un peu plus loin dans le texte de l'article du dictionnaire pour trouver une explication satisfaisante : « *Manifestation de l'énergie cinétique d'un système thermodynamique due à l'agitation des constituants de la matière.* » Tout est dit, ou presque. La température d'un corps n'est autre, en effet, que la perception macroscopique que l'on peut avoir, et indirectement mesurer, de l'agitation de ses molécules. Ce n'est que lorsqu'on la maintient à la température du *zéro absolu* qui correspond à $-273,15\text{ °C}$ (→ LEXIQUE) qu'une substance – quelle qu'elle soit – se trouve dans une immobilité totale¹¹. La moindre quantité d'énergie (→ LEXIQUE) qui lui est transmise suffit à réveiller son réseau moléculaire et le faire entrer en vibration. Même si cela est difficile à imaginer, les molécules formant une substance solide vibrent. Si un corps semble plus chaud qu'un autre, c'est tout simplement que le niveau d'agitation de son réseau moléculaire est plus élevé. On dira plus simplement que sa température est plus grande.

¹⁰ P. ROBERT. – *Petit Robert*, Dictionnaires Le Robert, Paris, 1995, p. 2225.

¹¹ À l'exception notable des électrons qui, au sein des atomes, continuent d'orbiter autour des noyaux.

Ce concept de température comme « *manifestation de l'énergie cinétique* » des réseaux moléculaires est très utile pour comprendre les changements d'état comme la fusion (passage de l'état solide à l'état liquide) et la vaporisation (passage de l'état liquide à l'état gazeux). Dans un solide, l'énergie cinétique du réseau moléculaire dans son ensemble est, en moyenne, inférieure aux énergies mises en œuvre par les liaisons intermoléculaires¹². C'est ce qui permet au solide de conserver une cohésion interne et une stabilité matérielle apparente. Lorsque l'énergie cinétique moyenne des molécules dépasse un certain seuil, le solide se transforme en liquide. Si l'énergie interne augmente encore, les dernières interactions moléculaires sont rompues et le liquide devient un gaz, état de la matière où chaque molécule demeure dans l'enceinte où elle a été placée sans autre détermination que de se déplacer librement jusqu'à percuter une autre molécule de gaz ou celles constituant les parois de l'enceinte qui la contient. Si de l'énergie est enlevée à un système moléculaire, c'est bien entendu une évolution inverse qui se produit : le gaz peut redevenir liquide et le liquide, se retransformer en solide¹³.

L'agitation moléculaire qui touche toutes les substances qui ne sont pas au zéro absolu, induit un phénomène dont l'importance est capitale pour ceux qui se préoccupent de conservation du patrimoine. On observe en effet que la cinétique chimique (ou cinétique réactionnelle) – comprenez la vitesse à laquelle se déroulent les réactions chimiques – s'accroît considérablement avec la température. On doit à un chimiste suédois, Svante Arrhénius¹⁴, d'avoir correctement formalisé cet effet en créant le concept d'*énergie d'activation*. Celle-ci se définit comme la quantité d'énergie qu'on doit fournir à des

¹² Ces liaisons sont des interactions d'origine électrostatique. Elles sont désignées par l'expression « forces de Van der Waals ». Elles ne doivent pas être confondues avec les liaisons chimiques proprement dites qui solidarisent des atomes (identiques ou non) pour former des édifices moléculaires plus ou moins complexes.

¹³ Dans certaines conditions de température et de pression, on peut observer des changements d'état solide → gaz (sublimation) et gaz → solide (condensation) sans passage par la phase liquide. Ces transformations directes sont mises à profit dans un processus industriel de séchage appelé *lyophilisation*. Ce procédé est parfois utilisé pour sécher des documents ayant été mouillés lors d'un dégât des eaux.

¹⁴ Svante Arrhénius (1859-1927, connu pour la loi qui porte son nom sur l'activation chimique proposa en 1887 une théorie de la dissociation électrolytique. C'est lui qui sut définir rigoureusement les acides et les bases comme donneurs respectivement d'ions H⁺ et OH⁻. Cette théorie lui valut de recevoir le prix Nobel en 1903.

substances pour enclencher une réaction chimique entre elles. Une feuille de papier ne brûle pas spontanément à la température ambiante¹⁵. En revanche, si on lui fournit une énergie d'activation suffisante, grâce à la flamme d'une allumette par exemple, la réaction de combustion se produira. Comme cette réaction est exothermique¹⁶, elle fournira au reste de la feuille de papier l'énergie d'activation nécessaire à la propagation de la combustion. Pour une réaction donnée, l'énergie d'activation permet que les liaisons chimiques des réactifs soient tout d'abord rompues avant que d'autres ne soient nouées pour la formation des produits de la réaction.

La loi d'Arrhénius permet de calculer un taux d'accroissement relatif de la cinétique d'une réaction chimique en fonction de l'énergie d'activation requise par les substances en présence, et de la température à laquelle se produit la réaction. L'application de cette loi d'allure exponentielle montre qu'en moyenne, un accroissement de 5 °C de la température double la cinétique réactionnelle. À l'inverse, une diminution de 5 °C la divise par deux. Ceci a d'importantes conséquences pour la conservation des fonds et collections. En effet, la loi d'Arrhénius fonde scientifiquement les recommandations de modération des températures dans les lieux d'exposition ou de conservation des biens culturels. Chaque degré de la température gagné (à la baisse !) se traduit par une augmentation incontestable de la durée de vie des documents.

¹⁵ La température d'auto-inflammation du papier est voisine de 230 °C. La température d'auto-inflammation d'une substance est la plus basse température à laquelle elle peut s'enflammer spontanément dans une atmosphère de pression et de composition normales, hors la présence de toute flamme ou étincelle.

¹⁶ Une réaction *exothermique* libère de l'énergie, une réaction *endothermique* en absorbe. Le changement d'état d'un liquide en gaz est un processus endothermique. Si l'évaporation de l'eau à la surface de la peau produit une sensation de froid, c'est que l'évaporation, pour se produire, absorbe de l'énergie prélevée à la peau. À l'inverse, la condensation de l'eau évaporée est un processus exothermique. L'énergie préalablement absorbée est alors restituée.

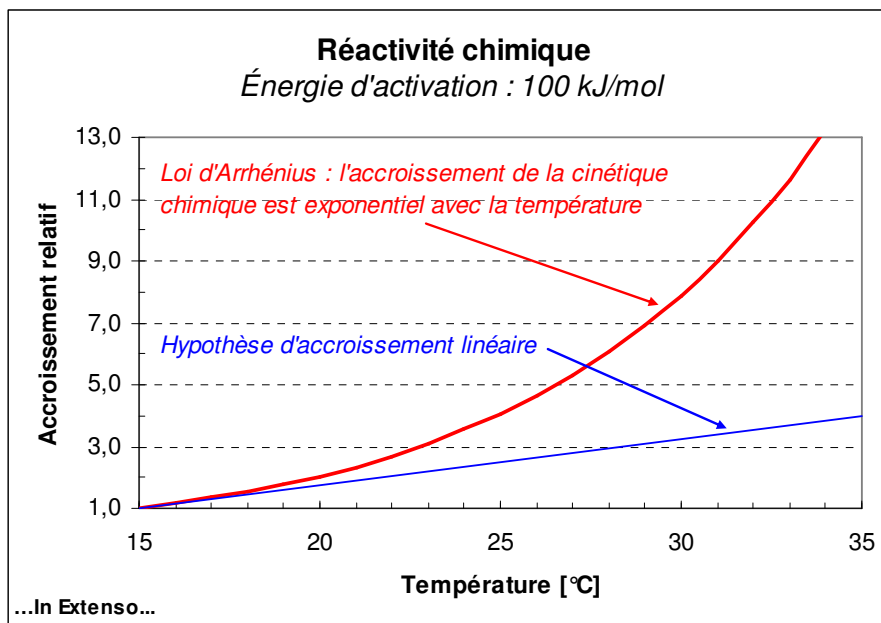


Figure 2 – Accroissement relatif de la cinétique chimique d'une réaction en application de la loi d'Arrhénius pour une énergie d'activation de 100 kJ/mol.

Une valeur d'activation de 100 kJ/mol a été retenue pour tracer la **Figure 2**. Cette valeur¹⁷ correspond peu ou prou à l'énergie de liaison des molécules de cellulose. On observe qu'en passant de 15 °C à environ 33 °C, la réactivité chimique a été multipliée par un facteur 12 ! Si la loi d'Arrhénius était linéaire, le facteur multiplicatif n'aurait été que de 4 ! La loi de l'accroissement de la cinétique chimique en fonction de la température invite donc à réduire la température des magasins d'archives si l'on veut accroître sensiblement la durée de vie des fonds et collections qui y ont été déposés.

Parmi les processus chimiques soumis à la loi d'Arrhénius qui affectent la durée de vie du papier, il convient de mettre en bonne place l'oxydation des chaînes de cellulose. Sans entrer dans le détail des réactions¹⁸, notons que la combinaison de l'oxygène avec certains radicaux des molécules constitutives du papier se traduit par la formation d'acides organiques dont l'action corrosive va largement contribuer à l'affaiblissement mécanique (résistance à la déformation) des documents puis à leur destruction.

¹⁷ Son ordre de grandeur est comparable à celle de l'énergie associée à un photon de rayonnement ultraviolet. C'est la raison pour laquelle il faut protéger le papier des rayonnements électromagnétiques et notamment des ultraviolets dont l'énergie est suffisante pour casser une chaîne de cellulose.

¹⁸ Pour plus de détails, voir [WÄCHTER, 1989] et [GIOVANNINI, 1999, pp. 150-152].

Influence de l'humidité relative sur la durée de vie du papier

À l'instar de la température, l'humidité relative influence-t-elle la durabilité du papier ? La réponse est malheureusement oui et, une fois de plus, il faut plonger dans les profondeurs sub-microscopiques de la matière pour comprendre les mécanismes de cette action. Le phénomène en question est appelé *hydrolyse*. L'étymologie du terme en livre la définition : du grec *hudôr* « eau » et *lusion* « solution, dissolution ». L'hydrolyse désigne donc un processus de décomposition chimique sous l'action de l'eau. Cette dernière est capable d'agir comme une véritable paire de ciseaux sectionnant des polymères en chaînes plus courtes. L'architecture complexe des molécules de cellulose est sensible au risque de l'hydrolyse, notamment lorsque le milieu est acide. En dessous d'un certain degré de polymérisation de ses composants cellulosiques, le papier devient extrêmement fragile. Plus acides, les papiers à base de pâte mécanique sont plus sensibles à ce mécanisme de destruction que les papiers anciens à base de chiffons ou ceux produits à partir de pâte chimique très purifiée.

D'où vient l'eau indispensable pour que se déclenche ce phénomène d'hydrolyse ? Elle est fournie par les molécules présentes dans l'environnement et qui sont adsorbées par le papier lorsque les conditions de température et d'hygrométrie le permettent. Un excès d'humidité est donc dangereux pour la conservation des documents. Cependant, une humidité insuffisante constitue également un risque. Lorsque son contenu en eau est trop faible, le papier voit son élasticité diminuer¹⁹. Il devient alors cassant. En conséquence, l'objectif à atteindre est donc le maintien d'une humidité relative modérée conduisant à un contenu en eau du papier suffisant pour lui conserver de bonnes propriétés mécaniques, mais pas trop élevé pour éviter une accélération du mécanisme d'hydrolyse.

Les valeurs recommandées de la température et de l'humidité relative pour assurer une bonne conservation des documents d'archives seront précisées plus loin mais, auparavant, il faut évoquer un autre facteur dont le rôle va se révéler fondamental : la stabilité du climat intérieur.

¹⁹ Ceci est également vrai pour les adhésifs, dont le module d'élasticité se réduit lorsque leur contenu en eau diminue. La résistance mécanique qu'ils doivent assurer s'en trouve compromise.

Un facteur fondamental : la stabilité climatique

Le dimanche 26 novembre 1922, sous les regards anxieux de son commanditaire Lord Carnarvon et de sa fille Lady Evelyn, Howard Carter, très impatient, descella l'ultime pierre qui obturait la deuxième porte de l'antichambre du tombeau de Toutânkhamon. Lorsqu'il pénétra enfin dans la salle jusque là inviolée où reposait depuis 3 249 ans le jeune pharaon, il fut frappé par la beauté prodigieuse et inaltérée des innombrables trésors qui jonchaient le sol de la sépulture. Leur parfait état de conservation relevait-il du miracle ? La seule explication rationnelle possible est d'attribuer cette exceptionnelle pérennité à l'extrême stabilité des conditions environnementales dans lesquelles ces objets précieux ont traversé les millénaires. Dans une tombe profonde de la vallée des Rois, les variations annuelles de température se comptent en dixième de degré, celles de l'humidité relative tournent autour de quelques pour cent.

A contrario, lorsque des objets patrimoniaux subissent de fortes et rapides fluctuations de leurs conditions d'ambiance, on observe une dégradation rapide. Pourquoi ? L'explication est à chercher du côté des effets mécaniques engendrés par les variations thermiques et hydriques que supportent les matériaux hygroscopiques. Les papiers, matériaux prépondérants dans les archives, sont tout particulièrement concernés par cette problématique qui touche à leur conservation.

Observons tout d'abord qu'un objet qui s'échauffe se dilate. Ce phénomène s'explique aisément. En transmettant une certaine quantité d'énergie calorifique à une substance, on accroît, de fait, son agitation moléculaire. En vibrant avec plus d'amplitude, une molécule occupe une place plus grande dans l'espace. La substance matérielle, en tant qu'édifice moléculaire, voit donc ses dimensions s'accroître. À l'inverse, si on réduit la température d'un objet, l'énergie cinétique moyenne de ses molécules diminue et les dimensions macroscopiques de l'objet s'en trouvent contractées.

Si le matériau concerné peut se déformer librement, ce phénomène de dilatation n'est pas dangereux pour lui. En revanche, si son expansion n'est pas permise, ou seulement limitée, alors il va subir des contraintes mécaniques très élevées. Imaginons un objet composé de plusieurs matériaux à l'exemple d'un ouvrage relié. Chacun des matériaux constitutifs (papier, parchemin, adhésif, etc.) possède un coefficient de dilatation différent. Il s'en suit que les contraintes mécaniques induites en leur sein, seront inégales. Cette

hétérogénéité est source de désordres graves pour les objets lorsque cette situation se répète fréquemment. Ajoutons qu'une variation de température de l'environnement n'a pas un effet immédiat sur la totalité de l'objet : sa surface va suivre rapidement le changement qui s'est produit, mais cette variation va se transmettre avec un certain retard au cœur de l'objet car le transfert thermique n'est pas instantané. On peut démontrer que si la variation de la température de l'environnement est d'allure sinusoïdale, l'objet subira également en son sein une fluctuation d'allure sinusoïdale mais dont l'amplitude variera en fonction de la profondeur considérée. De plus, les maxima (et les minima) seront décalés entre la surface et l'intérieur. Il s'ensuit que des contraintes mécaniques différentielles naîtront inévitablement à l'intérieur du matériau et, *a fortiori*, du document.

Les variations de l'humidité relative ont des effets semblables à celles de la température. Lorsque l'humidité relative fluctue, elle entraîne une variation concomitante du contenu en eau des matériaux hygroscopiques se traduisant, là encore, par des variations dimensionnelles et donc, la plupart du temps, par des contraintes mécaniques.

Il est maintenant temps de faire état d'une dernière complication. Elle est liée à la dépendance de l'humidité relative vis-à-vis de la température. L'humidité relative n'est pas une grandeur indépendante. Elle est liée à la fois de la pression de vapeur, c'est-à-dire de la quantité de vapeur d'eau présente dans une ambiance, mais aussi à la température. Ceci entraîne une conséquence très importante : si la pression de vapeur ne change pas, autrement dit, si le nombre de molécules d'eau en mélange avec l'air demeure constant, toute augmentation de la température se traduit par une baisse de l'humidité relative. Inversement, à chaque fois que la température de l'ambiance diminue, l'humidité relative s'accroît avec, bien entendu, une limite physique, la saturation de l'ambiance. Il n'y a rien de mystérieux dans tout cela. Cette dépendance s'explique parfaitement si on se réfère à la définition même de l'humidité relative (→ LEXIQUE). En quoi cette relation entre température et humidité relative influence-t-elle la conservation des documents ? Tout simplement par ce qu'elle rend plus dangereuses encore les fluctuations de la température ! Comme cela a été expliqué plus haut, ces dernières induisent des contraintes mécaniques dans les matériaux par le biais des dilatations différentielles. Mais un changement de température provoque également une variation de l'humidité relative et donc du contenu en eau des matériaux ! Les contraintes qu'ils subissent s'en trouvent amplifiées.

Quelle leçon doit-on retenir de tout cela ? Elle est simple : **la stabilité thermique et hydrique est la clé de voûte d'une bonne stratégie de conservation**. Elle doit être considérée comme l'objectif prioritaire de tout projet de construction, d'extension ou de réaménagement d'un bâtiment d'archives.

Les risques biologiques associés au climat

Si le climat peut être considéré comme un danger pour la conservation des documents patrimoniaux, il n'est pas le seul ! Les risques biologiques ne doivent pas être sous-estimés. De nombreuses espèces animales s'intéressent au papier. Citons les rongeurs et les insectes²⁰. Mais il convient de parler plus particulièrement des micro-organismes pour une raison fondamentale : leur développement est lié directement aux conditions climatiques qui règnent dans les magasins d'archives. Le danger lié à leur prolifération est que ces prédateurs disposent d'armes chimiques sophistiquées. Leur arsenal enzymatique est suffisamment puissant pour décomposer les chaînes celluloses du papier en simples molécules de glucose directement assimilables par les micro-organismes. Évidemment, pour les documents, le festin de ces hôtes indésirables se traduit par des altérations irréversibles.

Quels que soient les soins apportés à l'entretien d'un local où sont conservés des documents, une asepsie totale ne peut y être garantie. Et quand bien même on y parviendrait, le travail de désinfection serait à reprendre très rapidement car les sources de contamination sont constantes : l'occupation humaine, le renouvellement d'air, le déplacement des documents... Les spécialistes de l'hygiène hospitalière le savent bien, qui luttent en permanence contre les maladies nosocomiales avec, on le sait, un succès mitigé. Comme il est impossible de transformer les magasins de conservation en *salles propres*²¹,

²⁰ Pour les insectes, la liste serait longue. Pour plus de détails, on peut consulter [FLIEDER, 1999].

²¹ On appelle *salles propres* des salles à empoussièrément contrôlé. L'expression est la traduction directe de l'anglais *clean rooms*. En France, ce type de locaux est aussi désigné par l'expression « salle blanche ». Dans une salle propre classée ISO 7 selon la norme ISO 14644-1 : 1999 (c'est le niveau requis dans un hôpital pour une salle de réanimation ou une salle d'opération), on peut encore trouver plus 350 000 particules d'une dimension égale ou supérieure à 0,5 µm et 3 000 particules par mètre cube d'une dimension égale ou supérieure à 5 µm par mètre cube. Les spores de micro-organismes ayant une dimension comprises entre 5 et

force est d'aborder la question de l'infestation biologique d'une autre manière. L'idée est la suivante : **puisque'on ne peut interdire aux micro-organismes d'occuper les magasins d'archives, faisons en sorte que leur développement soit inhibé.** Pour cela, il suffit que les conditions de température et surtout d'humidité relative ne leur soient jamais favorables. Encore faut-il connaître leur environnement de prédilection ! Les recherches effectuées par les biologistes sur de nombreuses souches fongiques permettent d'avoir une bonne idée de leur métabolisme et des paramètres physico-chimiques qui le contrôlent. L'un des plus importants est sans aucun doute la disponibilité en eau, substance indispensable aux micro-organismes pour proliférer. S'il est vrai qu'ils n'ont pas tous les mêmes exigences, la plupart de ceux que l'on rencontre dans les archives ne se développent heureusement qu'avec des humidités relatives élevées. De fait, c'est essentiellement le contenu en eau du support qui compte mais, ainsi que cela a été expliqué dans le paragraphe « Interaction avec le climat » (page 16), ce contenu en eau dépend de l'humidité relative de l'ambiance. Pour évoquer cette question, les biologistes parlent de *l'activité en eau* du support (→ LEXIQUE). La définition de cette grandeur montre qu'elle se confond avec celle de l'humidité relative.

La **Figure 3** représente le seuil d'apparition de quelques micro-organismes communs en fonction de la température sèche (→ LEXIQUE) figurant en abscisse, de l'humidité relative et de l'activité en eau figurant en ordonnée²². On notera la concordance des deux échelles de l'humidité relative et de l'activité en eau.

50 microns, on peut affirmer que dans une salle propre ISO 7, il subsiste des risques d'infestation si les conditions climatiques s'avèrent favorables aux spores présentes ! Que dire d'un magasin d'archives...

²² D'après des données tirées de N. J. ROWAN *et al.* – "Prediction of Toxigenic Fungal Growth in Buildings by Using a Novel Modelling System", *Applied And Environmental Microbiology*, vol. 65, n° 11, nov. 1999, pp. 4814–4821.

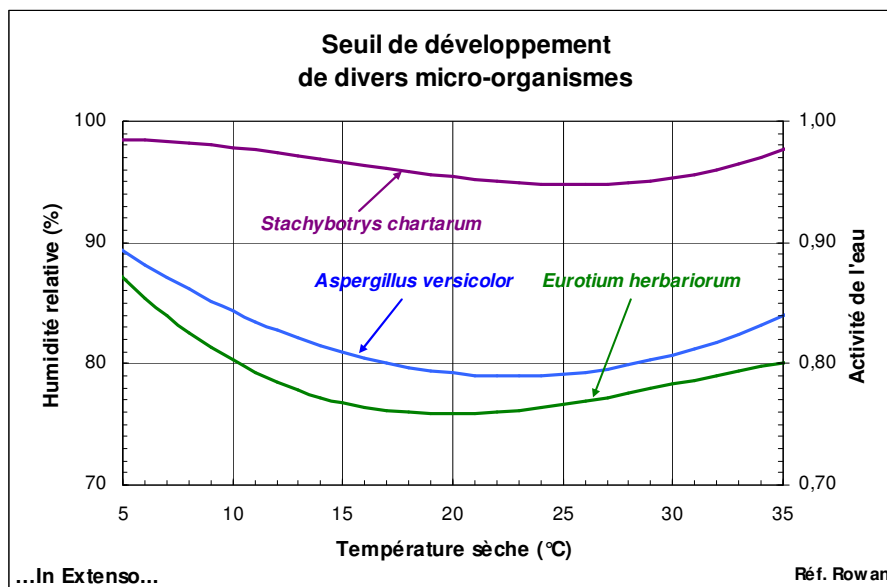


Figure 3 – Seuil de développement de quelques micro-organismes en fonction de la température sèche et de l'humidité relative.

Le graphe précédent ne concerne que trois souches fongiques. Lors d'une enquête approfondie menée dans une réserve de la bibliothèque de l' Arsenal à Paris par le laboratoire de cryptogamie du Muséum national d'histoire naturelle, pas moins de 72 espèces différentes ont été identifiées²³ ! On comprend immédiatement l'intérêt de ne pas laisser dériver les conditions thermohygrométriques jusqu'aux seuils de développement des diverses moisissures.

Le contrôle du climat permet d'accroître la durée de vie des archives

Des analyses qui précèdent, il apparaît, sans l'ombre d'un doute, que le climat dans lequel sont conservées des archives conditionnera très fortement leur durée de vie. Par climat, il faut entendre à la fois la prise en compte des valeurs minimales, moyennes et maximales que peuvent prendre la température et l'humidité relative, mais également la vitesse des variations que ces paramètres subissent. Un climat stable autour de valeurs

²³ M.-F. ROQUEBERT et al. – « Étude des moisissures dans une réserve de bibliothèque », *BBF*, 2001, t. 47, n° 6, pp. 84-88.

« raisonnables²⁴ » constitue la meilleure garantie pour une bonne conservation. À cet égard, les courbes *isopermes*²⁵ proposées par D. K. Sebera [SEBERA, 1994] constituent un bon outil de prévision de l'impact que peuvent avoir les valeurs moyennes de la température et de l'humidité relative sur la durée de vie d'une collection.

La méthode élaborée par D. K. Sebera repose sur l'idée que **la vitesse de détérioration des matériaux hygroscopiques est essentiellement influencée par la température et l'humidité relative**. Plus particulièrement, l'altération du papier sous l'effet de l'oxydation et de l'hydrolyse est une fonction croissante de la température et du contenu en eau. À l'inverse, la diminution de la température et du contenu en eau accroît la durée de vie du papier. S'appuyant sur la loi énoncée par Svante Arrhénius présentée précédemment, D. K. Sebera a développé une équation qu'il est possible de traduire en graphe comme le propose la **Figure 4**.

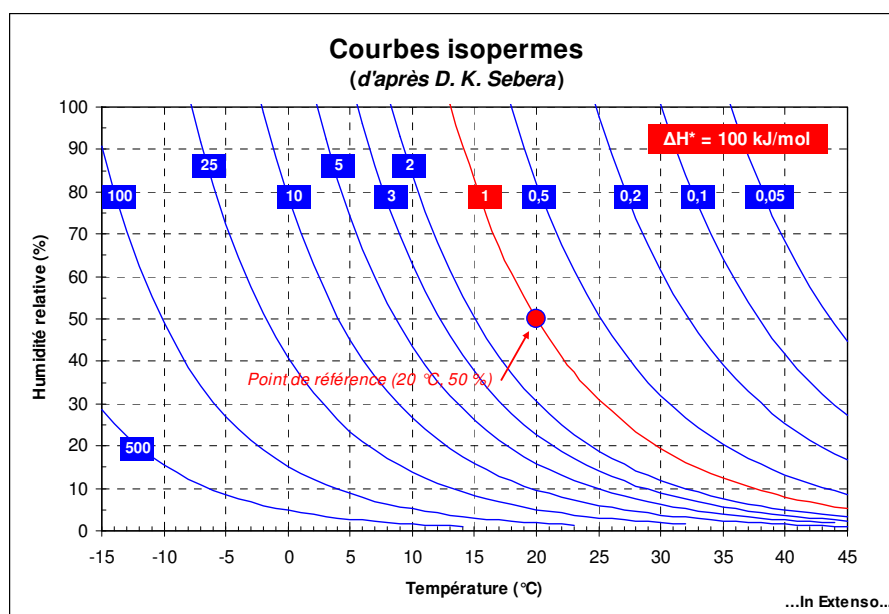


Figure 4 – Courbes isopermes pour une enthalpie d'activation de 100 kJ/mol d'après une équation de D. K. Sebera.

²⁴ Le paragraphe « Recommandations en matière de climat intérieur » (page 33) propose une discussion autour des valeurs que l'on peut qualifier aujourd'hui de « raisonnables » pour la conservation des différents documents constituant les archives.

²⁵ Néologisme forgé sur le grec *iso* « égal » et *perme*, contraction de permanence. Isoperme signifie donc « d'égale permanence ». Le terme s'utilise comme adjectif et comme substantif.

Sur la figure précédente, a été représenté un point de référence choisi arbitrairement et correspondant aux conditions : 20 °C, 50 %. Il permet de fixer, par convention, l'isoperme de valeur 1 (ici tracée en rouge). Tout point du graphe qui se trouve sur cette courbe correspond à une combinaison de température et d'humidité conduisant à une permanence équivalente au cas de référence. Toutes les courbes affichant un label inférieur à 1 correspondent donc à des combinaisons climatiques de la température et de l'humidité relative moins bonnes que la référence. *A contrario*, toutes les courbes situées à gauche (label supérieur à 1) dénotent des conditions environnementales plus favorables. Pour tracer le graphe précédent, l'équation proposée par D. K. Sebera a été calculée avec une énergie d'activation égale à 100 kJ/mol. C'est cette même valeur qui avait été utilisée avec la loi d'Arrhénius pour calculer la réactivité chimique de la dissociation de la cellulose (→ **Figure 2**, p. 24).

Prenons un exemple. Supposons que, placé dans une ambiance à 20 °C et 50 % d'humidité relative (correspondant à l'isoperme de valeur 1), un ensemble de documents ait une durée de vie de 100 ans. Imaginons maintenant que ce même ensemble soit déplacé dans un magasin dont les conditions sont : 17 °C, 40 %. Le graphe précédent permet de voir que ces paramètres se trouvent sur l'isoperme de valeur 2. On peut en déduire que la durée de vie espérée de la collection sera portée de 100 ans initialement, à 100 fois 2, soit 200 ans. À l'inverse, si les conditions du magasin de conservation sont fixées à 23 °C, 60 % (isoperme = 0,5), la durée de vie potentielle se réduit à 100 fois 0,5, soit 50 ans.

Un des grands intérêts de la méthode réside en ce qu'il n'est pas indispensable de connaître la durée de vie effective d'un document²⁶ pour l'utiliser. Plutôt que de raisonner sur des durées *absolues* dont la détermination semble pour le moins difficile, sinon impossible, il apparaît plus réaliste d'évaluer l'impact des conditions environnementales et de leur évolution sur la permanence d'un fonds ou d'une collection, de manière *relative*. En général, la détermination de la valeur de l'isoperme sera suffisante pour l'étude préliminaire d'une stratégie climatique adaptée à un magasin de conservation. Cette réflexion sera utilement conduite pendant la phase de programmation de l'opération de construction afin

²⁶ Cette information est en général impossible à connaître faute de données sur la nature exacte du papier constituant le document et sur son histoire climatique.

d'offrir aux maîtres d'œuvre en charge du projet, une base solide de réflexion et de proposition.

Recommandations en matière de climat intérieur

Quelles valeurs de la température et de l'humidité relative faut-il prévoir dans un magasin de conservation ? Il y a quelques années, la réponse aurait été facile : 18 °C, 55 % pendant les 8 760 heures composant une année²⁷. Avec le temps et l'expérience, ce dogme a volé en éclats. La politique de la *flat line*²⁸ a vécu. Les exigences nouvellement exprimées d'un développement durable de nos sociétés (→ « Traitement climatique des archives et « développement durable », page 102) renforcent encore la nécessité de choisir une technique de contrôle climatique des archives toujours aussi efficace en termes de conservation mais moins coûteuse en énergie que la stratégie de la *flat line*.

Cette remise en cause de ce qui, naguère, passait pour une évidence, trouve une de ses racines dans le constat, somme toute rassurant, que l'état sanitaire d'archives placées dans des locaux suffisamment inertes mais sans contrôle climatique particulier, n'était pas plus mauvais, après tout, que celui des fonds et collections qui avaient été conservés à grand prix, dans des espaces climatisés. Ceci se vérifie tout particulièrement sous des latitudes moyennes bénéficiant de climats dits tempérés. Autre source de réflexion : au cours des dix dernières années, la quasi-totalité des infestations microbiologiques qui se sont produites dans les magasins d'archives ont plutôt concerné des établissements équipés de climatisation.

Au demeurant, la sensibilité particulière des bâtiments climatisés aux risques biologiques peut s'expliquer par divers facteurs. Le premier relève souvent de la conception du bâtiment. L'édifice devant être climatisé, il apparaît parfois que peu d'efforts ont été consacrés à renforcer l'inertie thermique de la construction. Aussi, dès qu'une panne intervient, une dérive rapide des paramètres climatiques intérieurs se manifeste. Un mauvais

²⁷ 8 784 heures les années bissextiles.

²⁸ Cette expression (la « ligne plate » en français) est utilisée aux États-Unis pour désigner la stratégie consistant à maintenir toute l'année une température et une humidité relative constantes dans le local traité.

réglage des installations ou une puissance insuffisante de la déshumidification peut entraîner des valeurs trop élevées de l'humidité relative dans les magasins. Autre paramètre, l'installation technique elle-même constitue un vecteur idéal de propagation des spores actives lorsque des précautions draconiennes n'ont pas été prises et qu'une infestation active s'est déclarée.

Reposant sur de très nombreuses observations, l'expérience valide donc le souhait de nombreux responsables d'explorer la voie d'une démarche plus « douce » du contrôle climatique, quelque part entre le « on ne fait rien » et le « on climatise tout ». Mais, dès lors qu'on renonce à un traitement d'air pur et dur, il faut nécessairement abandonner l'idée de maintenir la température et l'humidité relative à des valeurs constantes été comme hiver. Il en résulte une grande difficulté à établir des recommandations précises. Il faudra donc accepter de raisonner sous forme de plages de valeurs plutôt que de rechercher des valeurs fixes aux vertus rassurantes mais trompeuses.

Il est cependant possible de dégager deux grands principes qui pourront servir de guide à la réflexion et au choix. Le premier est qu'**il est possible d'accepter une dérive annuelle des valeurs de consignes de la température et de l'humidité relative dans les magasins**. Un tel choix présente de nombreux avantages : minimisation des équipements techniques et donc des investissements, réduction des consommations énergétiques, amoindrissement des écarts climatiques entre les magasins et la salle de consultation, tolérance plus grande aux pannes, etc.

Le second impose que **les fluctuations des paramètres climatiques intérieurs à court terme, notamment à l'échelle quotidienne, soient maintenues à des valeurs aussi faibles que possible**.

Si le premier principe peut être vu comme une tolérance, le second sera perçu comme une contrainte limitant l'amplitude de variations de la température et de l'humidité relative au fur et à mesure que la dimension temporelle diminue. Tout ceci peut se résumer par des recommandations somme toute assez simples : **à court terme, il faut garantir la stabilité ; à long terme, on peut accepter la variabilité**. Ce sont ces idées qui seront déclinées dans les paragraphes suivants. Compte tenu de la sensibilité climatique distincte de chacun des matériaux constitutifs des archives, les recommandations les concernant seront examinées successivement.

Papier

Dans un ouvrage réunissant ses prescriptions techniques [ARNOULT, 1998], la Direction du livre et de la lecture propose les valeurs suivantes :

Supports	Température (°C)		Humidité relative (%)	
	Niveau	Fluctuation	Plage	Fluctuation
Parchemin	18	2	50 – 60	5
Papyrus	18	2	50 – 60	5
Papier	18	2	45 – 55	5

Tableau 1 – Conditions climatiques recommandées par la Direction du livre et de la lecture en 1998.

Il convient de remarquer que les températures indiquées dans le tableau précédent sont des valeurs fixes, que les plages pour l'humidité relative sont assez étroites et que la période au cours de laquelle les fluctuations sont admises n'est pas précisée.

Pour sa part, la norme NF ISO 11799:2003 suggère les valeurs suivantes²⁹ :

Supports	Température (°C)		Humidité relative (%)	
	Plage	Changement admissible quotidiennement	Plage	Changement admissible quotidiennement
Parchemin, cuir	2 – 18	± 1	50 – 60	± 3
Papier (conservation optimale)	2 – 18	± 1	30 – 45	± 3
Papier (zone fréquentée par le personnel)	14 – 18	± 1	35 – 50	± 3

Tableau 2 – Extrait partiel des recommandations de la norme NF ISO 11799:2003.

Les recommandations de la norme diffèrent des précédentes sur plusieurs points :

- ce n'est plus une température unique qui est donnée mais une plage, dont l'amplitude dépend de considérations liées à la gestion des fonds et collections ;

²⁹ NF ISO 11799:2003 - *Information et documentation – Prescriptions pour le stockage des documents d'archives et de bibliothèques*, AFNOR, janvier 2004 (annexe B). Un tableau complet des recommandations est proposé en annexe page 139.

- les plages indiquées pour l'humidité relative dans le cas du papier sont plus basses que celles du tableau 1 ;
- la base temporelle des fluctuations acceptées est indiquée.

Incontestablement, les recommandations de la norme NF ISO 11799:2003 sont plus précises que ne le sont celles de la Direction du livre et de la lecture. Cependant, l'application des valeurs indiquées ne peut être assurée sous nos latitudes qu'avec des moyens de contrôle climatique relativement sophistiqués. À cet égard, la norme demeure aussi contraignante que les prescriptions mentionnées naguère dans l'ouvrage de référence [DUCHEIN, 1985].

Hors la climatisation, n'y aurait-il point de salut pour la conservation des archives ? Si l'on accepte en été une dérive (très lente !) des températures vers des valeurs plus élevées, alors il devient envisageable de simplifier les installations, voire de supprimer toute climatisation. Toutefois, comme cela a été rappelé précédemment, de telles élévations de la température se traduisent par une dégradation plus rapide des documents. **L'idée est donc de compenser ces valeurs estivales élevées par des valeurs hivernales plus basses.** La méthode des isopermes va permettre de vérifier la pertinence de cette approche.

Prenons comme point de départ la température et l'humidité relative recommandées par M. Duchein, soit 18 °C et 55 %. On notera que ce couple de valeurs se situe un peu au-delà de la marge haute des recommandations de la norme NF ISO 11799. L'isoperme correspondante vaut 1,15. L'objectif à atteindre est un scénario de température et d'hygrométrie tel que l'isoperme annuelle équivalente ne soit pas inférieure à 1,15. Les deux graphes suivants permettent de comparer deux scénarios. Le premier respecte les valeurs suggérées par M. Duchein, le second propose d'appliquer des consignes variables de la température et de l'humidité relative.

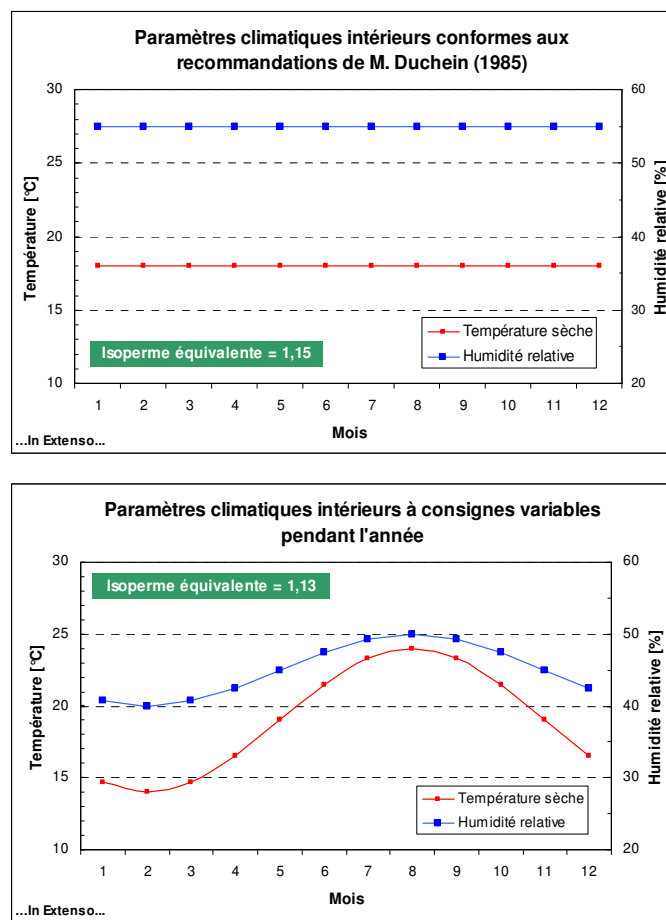


Figure 5 – Comparaison d'une stratégie à consignes climatiques constantes et à consignes climatiques variables en fonction de la saison.

Les valeurs calculées des isopermes équivalentes des deux scénarios sont pratiquement égales. Il est donc possible d'affirmer que, du point de vue de la conservation des fonds et collections, les deux options sont équivalentes. Cependant, il est évident que le scénario à consignes variables sera infiniment moins exigeant en termes d'investissements matériels et de coût d'exploitation (énergie, maintenance).

Dans ses dernières recommandations [DAF, 2009], la direction des Archives de France adopte ce point de vue. Voilà un extrait de son document de référence :

« La température doit être comprise entre 16 °C et 22/23 °C voire 25 °C exceptionnellement avec une variation maxima de 2 °C par semaine et de un degré par 24 heures.
L'hygrométrie à corrélérer avec la température doit être comprise entre 45 et 55 % maxima pour éviter le développement de microorganismes. Une variation maxima de 5 % d'humidité relative par jour est admise. »

La plage recommandée par la DAF est représentée sur la **Figure 6** tracée sous forme d'un diagramme dit *psychrométrique* (→ LEXIQUE). Il constitue une représentation graphique des relations thermodynamiques entre toutes les propriétés physiques de l'air humide. On notera que la pression atmosphérique pour laquelle sont calculées les grandeurs caractéristiques représentées graphiquement, n'est pas indiquée sur le graphe. En lieu et place figure l'altitude du lieu. Cette alternative est strictement équivalente puisqu'à chaque altitude correspond une pression de référence aisément calculable³⁰.

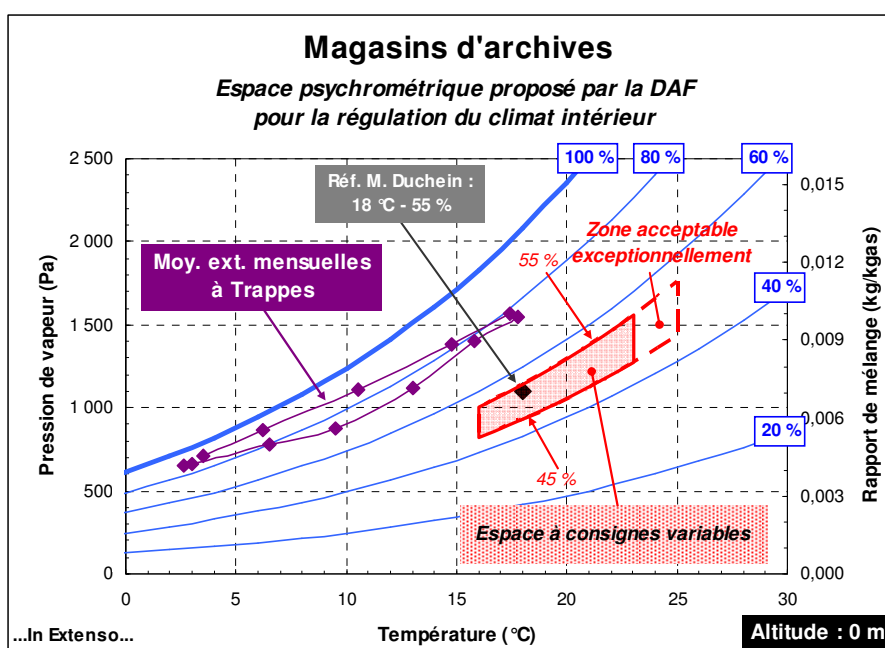


Figure 6 – Espace psychrométrique recommandé par la DAF avec rappel des valeurs préconisées naguère par M. Duchein. En surimpression les valeurs climatiques extérieures moyennes mensuelles de Trappes (région parisienne) sont représentées.

Ce graphe permet de voir que le respect d'une consigne annuelle unique, comme le proposait M. Duchein, contraint à ajuster en permanence l'humidité de l'air, trop faible l'hiver, trop élevée en été en regard des évolutions climatiques extérieures représentées ici

³⁰ Au niveau de la mer (altitude de référence 0 m), la pression atmosphérique de référence vaut 101 325 Pa. À 500 m d'altitude, la pression de référence n'est plus que de 95 500 Pa, soit une baisse de 5,7 %. À 1 000 m, elle tombe à 89 900 Pa, soit une diminution de 11,3 % qu'il convient de comparer aux fluctuations de la pression atmosphérique en un même lieu qui ne dépassent pas 3 % au cours de l'année. L'influence de l'altitude est donc bien plus importante que les variations barométriques enregistrées à l'occasion des changements de temps. Il importe que ce paramètre soit toujours pris en compte dans les calculs climatiques.

par les valeurs moyennes observées à Trappes, une ville d'Île-de-France. En effet, l'objectif permanent d'une ambiance à 18 °C et 55 % d'humidité relative correspond à un rapport de mélange de 7 grammes de vapeur par kilogramme d'air sec ($\text{g}_v/\text{kg}_{\text{as}}$) alors qu'au cours de l'année, l'air extérieur voit son rapport de mélange varier de 4,1 à 9,8 $\text{g}_v/\text{kg}_{\text{as}}$ en moyennes mensuelles, avec une moyenne annuelle de 6,6 $\text{g}_v/\text{kg}_{\text{as}}$. En revanche, pour peu que l'inertie thermique et hydrique des magasins de conservation soit suffisante, le choix d'un espace de contrôle psychrométrique à consignes variables permet de suivre facilement les variations hydriques moyennes de l'air extérieur et même de supporter ponctuellement des valeurs plus élevées. Il demeure cependant que l'hiver pourra nécessiter une humidification partielle de l'air, les valeurs basses de la plage demeurant un peu au-dessus des valeurs extérieures du rapport de mélange.

Selon les régions considérées, on peut être amené à proposer des plages climatiques intérieures légèrement différentes de celles qui sont représentées ci-dessus pour tenir compte de singularités locales. De même, pour des documents particulièrement fragiles, il est toujours possible de proposer des cibles plus contraignantes. Toutefois, une étude particulière devra être conduite pour savoir, le cas échéant, s'il n'est pas plus économique d'aménager un rangement spécifique dans une armoire spécialement climatisée pour ces documents, plutôt que d'imposer des exigences d'ambiance trop serrées à tout un magasin.

Documents photographiques

Les documents photographiques constituent sans aucun doute les objets patrimoniaux les plus difficiles à conserver. Leur instabilité chimique les rend particulièrement sensibles à la température³¹. À cet égard, les documents en couleur (films, négatifs, tirages) sont les plus fragiles.

Pour des valeurs indicatives des paramètres climatiques à respecter dans les magasins de conservation réservés aux documents photographiques, on pourra se référer aux données figurant dans l'annexe « Conditions climatiques recommandées par la norme ISO 11799:2003 » (p. 139).

³¹ Dans le temps, les supports à base de nitrate de cellulose se décomposent en gaz nitreux, une substance très oxydante, toxique et explosive. De plus le nitrate de cellulose à son stade de dégradation ultime, s'enflamme spontanément à des températures dépassant à peine 40 °C.

On observera que la norme n'évoque pas les films ou négatifs sur support à base de nitrate de cellulose, dont la conservation pose des problèmes particulier de sécurité³². Si de tels supports étaient identifiés dans les collections, il conviendrait d'étudier un mode de conservation adapté ou de les confier à des organismes spécialement équipés pour abriter ces supports potentiellement dangereux.

Documents magnétiques

À l'instar de ceux sur supports photographiques, les documents magnétiques souffrent d'une instabilité intrinsèque. Les contraintes de conservation sont donc, là encore, importantes. Des valeurs des paramètres climatiques à respecter sont suggérées dans la norme ISO 11799 (voir annexe précédemment citée).

Magasins mixtes

Lorsque des magasins reçoivent des collections hétérogènes comportant des documents dont les supports exigent des conditions de conservation très différentes, deux solutions sont possibles : réaliser un compromis dans le choix des paramètres climatiques à respecter, ou séparer les documents dont les exigences sont trop différentes. Les valeurs numériques données doivent alors être utilisées comme des objectifs. Le projet technique permettra d'unifier ces objectifs de manière à respecter une certaine cohérence globale des équipements, dans le respect des exigences de conservation.

³² Les locaux contenant des matériaux dangereux comme les nitrates de cellulose doivent satisfaire aux obligations spécifiques de la réglementation sur les installations classées qui impose des contraintes constructives sévères ainsi que le respect de procédures administratives particulières.

Chapitre 3

Quelles sont les relations entre le climat extérieur, le bâtiment et le climat intérieur ?

Le climat extérieur

Comme l'expérience le montre, les variations climatiques extérieures constituent les principaux facteurs de perturbation (au sens physique du terme) de l'ambiance intérieure de tout bâtiment. Les espaces abritant des fonds d'archives n'échappent pas à la règle. Cependant, chaque bâtiment ne réagit pas de façon identique aux mêmes sollicitations. Sa localisation, sa volumétrie, la nature de ses matériaux, la présence d'ouvertures plus ou moins étanches, etc., constituent autant de paramètres influençant son comportement *dynamique*³³ particulier. Cependant, les bâtiments d'archives se distinguent des autres constructions en ce qu'ils abritent des collections dont la masse importante et les propriétés hygroscopiques vont jouer un rôle considérable. Cette influence est si grande qu'en l'absence de tout équipement technique et notamment de ventilation introduisant de l'air neuf en grande quantité, on observe, quelque soit les variations de la température intérieure, une relative constance de l'humidité relative dans les magasins qu'on ne peut expliquer que par l'effet tampon des archives elles-mêmes. Cette « auto-régulation » est accomplie par les collections par le biais de la restitution ou de l'absorption d'une très faible quantité de vapeur d'eau à l'air des magasins. Une description détaillée de ce phénomène est donnée dans l'annexe « Le comportement thermohygométrique du papier » (page 129).

³³ L'adjectif « dynamique » est utilisé ici au sens des physiciens. Un synonyme tiré du vocabulaire courant pourrait être « évolutif ». Quelques commentaires complémentaires sur ce sujet seront apportés plus loin.

La **Figure 7** schématise les relations existant entre les principaux paramètres climatiques intérieurs et extérieurs. La lettre grecque θ désigne la température, ε , l'humidité relative. Quand à la notation m , elle représente le rapport de mélange de l'air (\rightarrow LEXIQUE). L'indice « e » correspond à l'extérieur tandis que « i » concerne l'intérieur. Les flèches identifiées par des lettres symbolisent les relations de dépendance. Ainsi, l'existence d'une flèche entre θ_e et θ_i indique que θ_i est dépendant de θ_e . Mais l'inverse n'est pas vrai.

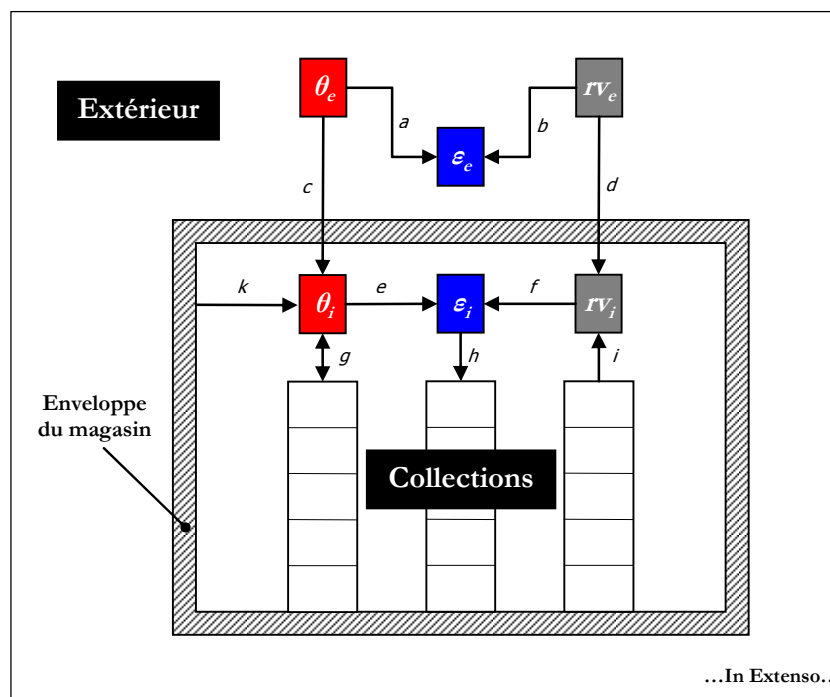


Figure 7 – Schéma relationnel entre les paramètres climatiques extérieurs et intérieurs, le bâtiment et les collections.

La **Figure 7** permet de voir que l'humidité relative intérieure n'a aucune relation directe avec l'humidité relative extérieure. Elle dépend d'une part de la température intérieure et, d'autre part, du rapport de mélange intérieur. Par ailleurs on voit que les collections subissent l'effet conjoint de la température du magasin et de l'humidité relative et y réagissent en modifiant le rapport de mélange de l'air, provoquant une rétroaction sur l'humidité relative. On notera que cette figure ne comporte qu'une seule flèche double, g , celle qui lie la température de l'air et les collections. En effet, la température de l'air affecte celle des collections mais l'inertie thermique de ces dernières constitue, là encore une boucle de rétroaction. Ainsi, après une période d'augmentation de la température intérieure, si cette dernière tend à s'abaisser, la diminution observée sera moindre car les collections restitueront une partie de la chaleur qu'elles auront accumulée. Enfin, on remarquera

l'influence de l'enveloppe du magasin sur la température intérieure (flèche k) et sur le rapport de mélange (flèche l). Ce dernier effet est dû aux propriétés hygroscopiques des parois et de leur capacité à éventuellement stocker et transférer de la vapeur d'eau.

Bien qu'elle ait été largement simplifiée, la **Figure 7** donne une idée de la complexité des problèmes posés. L'étude détaillée d'un bâtiment d'archives nécessite une compréhension profonde des phénomènes évoqués. Pour les concepteurs, il s'agira d'analyser comment les sollicitations climatiques extérieures se traduisent, à l'intérieur de l'édifice, par une évolution plus ou moins importante de la température sèche et de l'humidité relative en relation avec le comportement des collections. Mais, avant d'aller plus loin, il convient de connaître parfaitement la nature et l'intensité des sollicitations climatiques extérieures.

Deux paramètres jouent un rôle prépondérant : la température de l'air et son humidité relative. Deux autres, l'ensoleillement et le vent, influencent directement les précédents mais peuvent avoir également un effet direct sur les bâtiments : transferts d'énergie pour l'ensoleillement, infiltrations pour le second. Pour différents qu'ils soient en nature, ces quatre paramètres partagent une même et dangereuse caractéristique du point de vue de la conservation des documents : la *variabilité*.

Pour l'illustrer, un seul exemple sera suffisant, celui de la ville de Strasbourg. Bien sûr, le climat du Bas-Rhin n'est pas celui de la pointe Bretagne ou des Causses, celui de la côte méditerranéenne ou du Pas-de-Calais. Toutefois, les conclusions qui seront tirées de l'analyse seront, dans leur principe, applicables partout ailleurs.

Dans la plupart des dossiers de calculs fournis par les bureaux d'études en charge de concevoir les équipements climatiques des bâtiments, on constate que les ingénieurs s'appuient sur deux valeurs dites *de référence* de la température extérieure associées à deux valeurs de l'humidité relative : la première série pour l'hiver, la seconde pour l'été. Les calculs qu'ils réalisent n'ont pas d'autres bases. La **Figure 8** représente l'ensemble des valeurs horaires de la température et de l'humidité relative mesurées au cours d'une année moyenne à Strasbourg projeté sur un diagramme psychrométrique (→ LEXIQUE). Sur la même figure, ont été représentées les valeurs de référence habituellement retenues pour les calculs thermiques de base réalisés par les maîtres d'œuvre.

Bien qu'il soit difficile de le vérifier visuellement, il n'y a pas moins de 8 760 points sur le graphe, chacun d'entre eux correspondant à un couple de valeurs horaires de la

température et de l'humidité relative. Projetés sur le diagramme, ils forment collectivement une sorte de nuage caractéristique du climat du lieu d'observation. L'examen de ce graphe permet de comprendre immédiatement le caractère très conventionnel du choix de valeurs de référence pour la température et l'humidité relative. Le climat s'y trouve résumé à ses valeurs extrêmes d'hiver et d'été mais cette réduction occulte le caractère le plus fondamental du climat extérieur : sa variabilité !

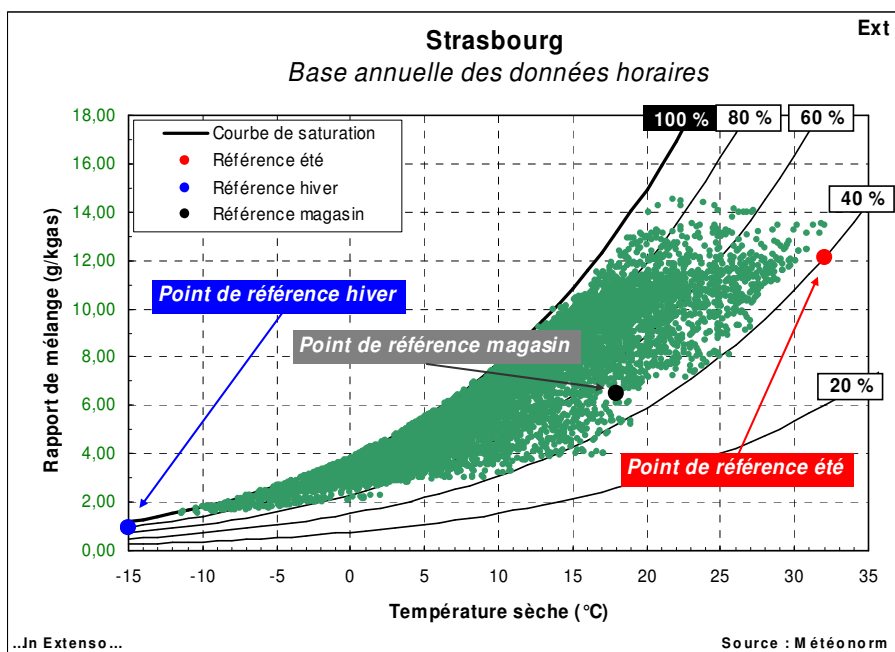


Figure 8 – Conditions extérieures (données horaires) pour Strasbourg avec indication des points de référence habituellement utilisés par les maîtres d'œuvre.

Sur ce même graphe, figure un autre point de référence : celui correspondant aux conditions intérieures souhaitées pour un magasin de conservation, soit une température de 18 °C et une humidité relative de 50 %. Le diagramme psychrométrique indique immédiatement que ces conditions correspondent à un rapport de mélange de 6,5 g_v/kg_{gas} (→ LEXIQUE). La lecture du graphe permet de constater qu'au cours de l'année, les valeurs du rapport de mélange de l'air extérieur fluctuent entre un minimum inférieur à 2 g_v/kg_{gas} et un maximum qui dépasse 14 g_v/kg_{gas}. On notera au passage que le point de référence estival retenu par les bureaux d'études correspond à un rapport de mélange de 12 g_v/kg_{gas}, valeur plus basse que celle du maximum observé. Ceci introduit un risque de sous-estimation des besoins de déshumidification des magasins d'archives. Ceci est vrai pour Strasbourg dont le climat est illustré ici mais se vérifie en de nombreux autres lieux.

Le deuxième graphe proposé illustre un autre paramètre très important du climat : l'irradiation solaire.

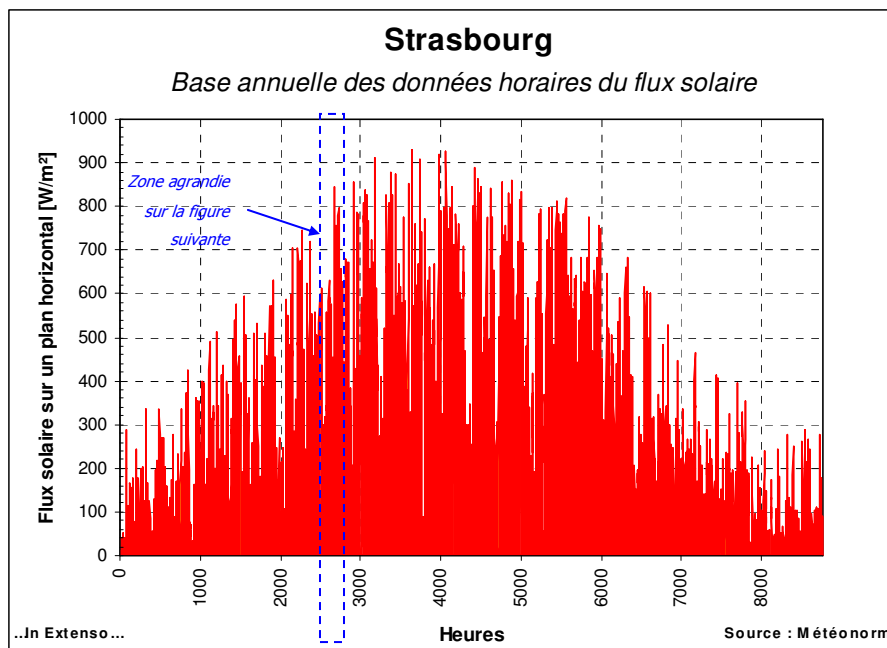


Figure 9 – Flux solaire à Strasbourg.

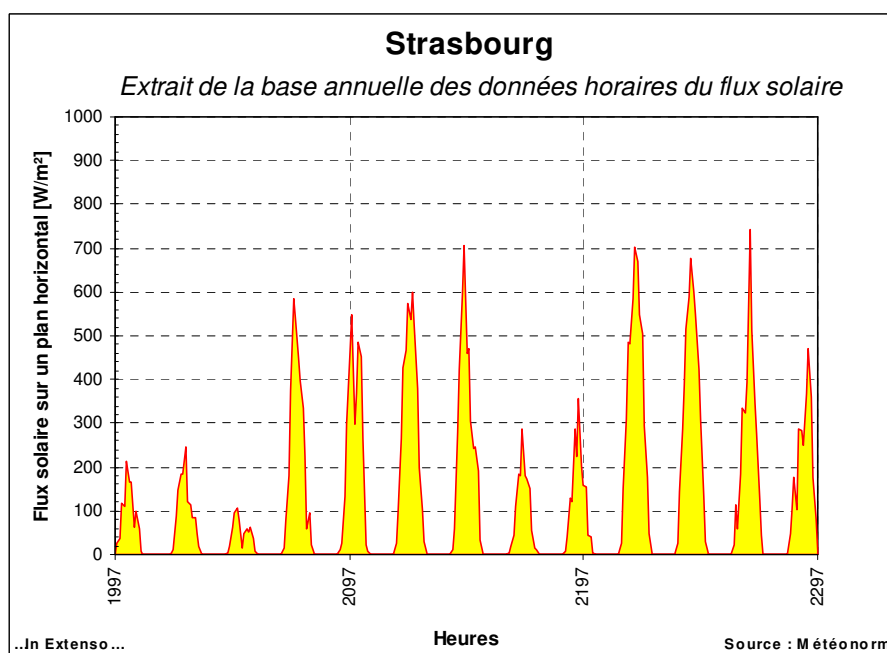


Figure 10 – Flux solaire à Strasbourg pendant le printemps.

La **Figure 9** illustre parfaitement la variabilité du flux solaire. Si, en hiver, le flux solaire incident sur un plan horizontal n'atteint pas 300 W/m^2 , il dépasse les 900 W/m^2 en

été. Le graphe suivant (**Figure 10**) constitue un agrandissement de la figure précédente. Il concerne une période de 13 jours au début du printemps.

Cette variabilité sur laquelle il convient d'insister, y est illustrée de manière plus frappante encore. On notera qu'elle prend également le caractère d'une *discontinuité* du fait de l'alternance des jours et des nuits.

Les démonstrations précédentes peuvent être aisément renouvelées avec un examen du dernier paramètre climatique important, le vent. Si, comme chacun sait, la direction du vent est variable, sa vitesse ne l'est pas moins. Cette dernière influencera directement la quantité d'air pénétrant dans le bâtiment par infiltration, forçant ainsi un renouvellement d'air incontrôlé qui peut poser de très nombreux problèmes : déstabilisation thermique et hydrique, pollution intérieure (physique, chimique et biologique).

Si l'on ajoute que ces variabilités annuelles des paramètres climatiques extérieurs sont redoublées par des fluctuations interannuelles, que faut-il en conclure ? Puisque l'objectif à atteindre dans les magasins de conservation est la plus grande stabilité possible, on ne saurait sous-estimer cette variabilité des sollicitations extérieures. En ce sens, la prise en compte de deux points de référence seulement est dangereuse. L'étude climatique d'un bâtiment recevant des collections patrimoniales, dont on connaît la sensibilité aux variations rapides des paramètres environnementaux, doit impérativement intégrer cette contrainte physique permanente créée par les fluctuations du climat extérieur. Autrement dit, le modèle qu'élabore l'ingénieur en charge de l'étude doit comporter une dimension temporelle, ce qui, il est vrai, complexifie considérablement les équations qu'il doit utiliser. On ne saurait correctement caractériser la « réponse » d'un édifice sans intégrer dans l'analyse une description correcte des sollicitations qu'il supporte.

Cette exigence conduit à une conséquence importante : l'étude climatique d'un bâtiment d'archives ne peut se satisfaire d'une approche conventionnelle limitée aux calculs traditionnels des puissances (→ LEXIQUE) calorifiques et frigorifiques maximales³⁴. Elle exige une approche *dynamique* fondée sur une modélisation très fine des échanges

³⁴ L'approche conventionnelle suppose que les valeurs de référence de la température et de l'humidité relative sont constantes, autrement dit que rien ne change dans le temps. Les calculs sont dits en *régime établi*. On parle également d'approche *statique*. Par opposition, dans l'approche *dynamique*, aucune hypothèse sur la constance des paramètres n'est faite, ce qui revient à réintroduire la variable « temps » dans les calculs.

thermohygro-métriques qui se produisent dans les bâtiments et qui fluctuent dans le temps. Cette méthodologie qui s'appuie sur des calculs de simulation tenant compte des variations horaires des paramètres climatiques extérieurs et des éventuelles charges thermiques et hydriques intérieures, nécessite un réel engagement des ingénieurs en charge des projets. En France, force est de constater que les bureaux d'études recourent très rarement, sinon jamais, aux calculs de simulation³⁵. Il appartient donc au Maître d'ouvrage d'imposer aux bureaux d'études de les utiliser en introduisant cette demande dès l'élaboration de son programme de construction.

Influence des facteurs architecturaux sur le climat intérieur

L'extrême variabilité du climat extérieur a été mise en évidence dans les paragraphes précédents. Mais comment ces fluctuations se traduisent-elles à l'intérieur des bâtiments ? Telle est la question fondamentale pour la conservation des fonds et des collections à laquelle il convient maintenant de répondre. Une première réponse est donnée par la **Figure 11** qui mérite un examen attentif.

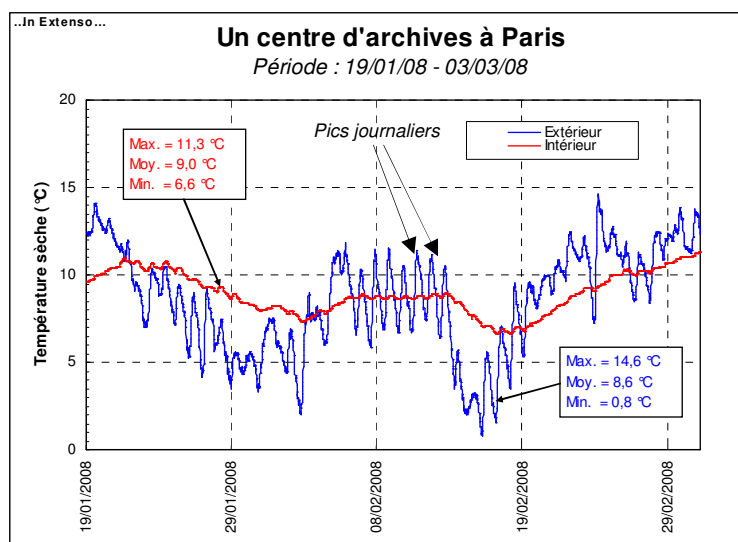


Figure 11 – Comparaison des températures intérieures et extérieures dans un centre d'archives parisien.

³⁵ Des logiciels comme TRNSYS, TAS, DOE-2, ENERGYPLUS, ESP-r, disponibles depuis de très nombreuses années, devraient être d'usage courant dans les bureaux d'études français. Ce n'est malheureusement pas encore le cas...

La courbe rouge montre l'évolution de la température entre le 19 janvier 2008 et le 3 mars 2008 à l'intérieur d'un bâtiment d'archives situé à Paris et dépourvu de tout dispositif de chauffage. La courbe bleue concerne l'évolution de la température extérieure pendant la même période de 44 jours. L'examen comparatif des deux courbes est riche d'enseignements. On observera tout d'abord que les moyennes sur la période considérée des températures à l'extérieur et à l'intérieur sont très voisines : 8,6 °C à l'extérieur contre 9,0 °C à l'intérieur. Ceci confirme que le bâtiment d'archives ne reçoit aucun apport énergétique par l'intermédiaire d'un système technique quelconque mais qu'en revanche quelques apports calorifiques internes se manifestent³⁶ ainsi que, probablement, l'effet thermique intérieur de l'ensoleillement. Pourtant, en dépit de la similarité des moyennes, l'évolution de la température intérieure au jour le jour ne se confond pas, de toute évidence, avec celle de l'air extérieur. Cependant, une tendance évidente se manifeste : lorsque, par delà ses fluctuations quotidiennes, la température extérieure est à la baisse (c'est le cas pendant les dix derniers jours de janvier), on observe une diminution également à l'intérieur mais sur un rythme plus lent. À l'inverse, quand la température extérieure est clairement à la hausse (voir la séquence de la fin février), on note une augmentation de la température intérieure. Pour confirmer cette corrélation, on peut examiner ce qui se passe entre le 6 et le 14 février. À l'extérieur, la température fluctue quotidiennement avec une amplitude régulière d'environ 5 °C autour d'une valeur moyenne de 8,5 °C. Or, dans le même temps, la température intérieure se stabilise exactement à la même valeur moyenne avec une fluctuation intérieure qui est pratiquement insignifiante.

Bien entendu, ces évolutions ne doivent rien au hasard. Le comportement de l'ambiance intérieure est totalement déterminé par un ensemble de facteurs identifiables même s'il est parfois difficile, dans les faits, de les identifier ! Globalement, l'enveloppe du bâtiment joue le rôle d'un *filtre* vis-à-vis de la température extérieure effaçant pratiquement les alternances à court terme (celles qui apparaissent à l'échelle de la journée) mais laissant passer les fluctuations à plus long terme comme les variations décadaires et, *a fortiori*, saisonnières. Il est possible d'établir une analogie avec le domaine de l'électronique. Lorsqu'ils veulent se débarrasser de perturbations affectant le signal transmis par un circuit,

³⁶ Les apports internes sont de nature diverses : occupation humaine, éclairage, énergie thermique rejetée par des équipements techniques, apports par transmission provenant de locaux voisins.

les ingénieurs font appel à des filtres qui permettent d'éliminer les fréquences du signal au dessus ou en dessous d'un certain seuil. Si l'on compare maintenant les fluctuations du climat et, en l'espèce, celles de la température, à un signal composé de plusieurs ondes caractérisées par des fréquences distinctes, on pourra dire que l'enveloppe du bâtiment fonctionne comme un *filtre passe-bas*, autrement dit, comme un filtre laissant passer les basses fréquences, c'est-à-dire les variations saisonnières, et éliminant les hautes fréquences telles que les variations quotidiennes. Ce rôle de filtre qui vient d'être caractérisé, n'est rien d'autre que la forme spécifique que prend ici la *fonction de transfert* schématisée par la **Figure 12**.

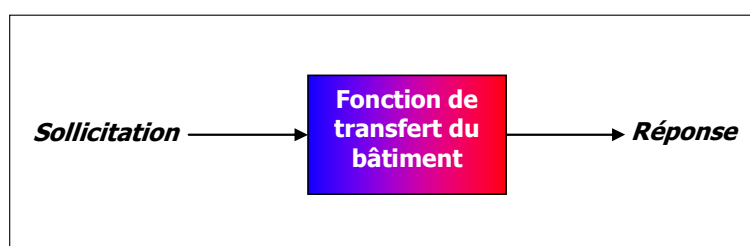


Figure 12 – Schéma relationnel entre les sollicitations climatiques extérieures et la réponse d'un bâtiment à cette sollicitation.

L'idée que les sollicitations de la température extérieure puissent être vue comme des signaux complexes constitués d'une superposition d'ondes de différentes fréquences ne se réduit pas à une simple métaphore. Dans l'annexe intitulée « Comparaison d'une sollicitation climatique et de la réponse d'un bâtiment » (page 135), est proposée une vérification de cette approche fondée sur l'utilisation de la *transformée de Fourier*, un outil mathématique très puissant permettant de réaliser une analyse du spectre des fréquences contenues dans un signal.

La dépendance de la température intérieure vis-à-vis de la température extérieure peut être démontrée par la mise en œuvre d'un *modèle physique*³⁷ permettant de simuler l'action régulatrice du bâtiment. La **Figure 13** illustre les résultats obtenus avec un modèle

³⁷ Pour un physicien, un *modèle* est une représentation mathématique d'un *système physique*, c'est-à-dire d'un ensemble plus ou moins complexe d'éléments matériels dont on veut analyser le comportement collectif. Un modèle est dit *statique* si les paramètres d'entrées sont constants. En revanche, si le modèle peut recevoir des sollicitations variables dans le temps, il est qualifié de *dynamique*. Puisque ce sont les fluctuations climatiques et leurs amplitudes qu'il importe d'analyser, l'étude des bâtiments recevant des collections patrimoniales doit donc faire appel à des modèles dynamiques.

dynamique simple représentant le bâtiment d'archives étudié dans lequel a été introduit, en guise de sollicitation, les valeurs mesurées de la température extérieure. On observe une grande similitude entre la courbe représentant les valeurs mesurées de la température et celle relative aux températures calculées. Sur la période de 44 jours considérée, la moyenne des valeurs mesurées de la température intérieure est de 8,97 °C contre 8,74 °C pour les valeurs calculées soit un écart minime de 0,23 °C.

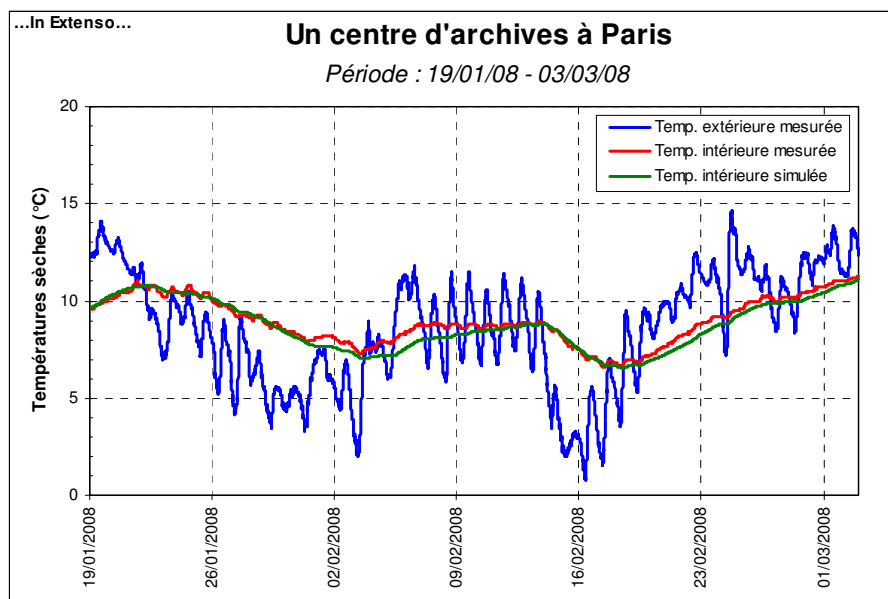


Figure 13 – Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs calculées de la température intérieure d'un centre d'archives à Paris.

Ce bon résultat confirme que **le comportement intérieur des locaux est prévisible dès lors que les principales caractéristiques physiques des locaux sont connues**. L'utilisation d'outils de simulation constitue donc une approche très riche pour l'étude des bâtiments de conservation, soit qu'il s'agisse d'un édifice à créer ou bien d'une construction à réhabiliter.

Il est remarquable de constater que tous les bâtiments se comportent de la même façon, quoiqu'à des degrés très divers. En tant que filtre de la température extérieure, considérée comme une onde, un château-fort sera, à l'évidence, beaucoup plus efficace qu'un bâtiment vitré. En effet, cette propriété est directement liée à l'inertie ou capacité thermique d'une construction. Plus un bâtiment bénéficie d'une masse importante et plus sa fonction de filtre sera efficace. Mais, si l'on veut correctement évaluer le rôle régulateur de l'enveloppe, un autre facteur doit être pris en compte. Il s'agit de la *conductance thermique*

*globale*³⁸ du bâtiment. À inertie identique, plus la conductance thermique est importante et plus l'*effet filtre* est diminué. Comme les pertes par ventilation constituent une composante notable de la conductance thermique, elles peuvent, si elles sont trop élevées, annihiler presque entièrement le rôle bénéfique de l'inertie. Si, dans un château-fort naturellement stable, on laisse les baies ouvertes, accroissant ainsi de manière considérable la conductance thermique du bâtiment, il régnera dans les pièces de l'édifice une température peu différente de l'extérieur, quelle que soit l'épaisseur des murs...

Toutes les parois d'une pièce peuvent contribuer à son inertie et donc à sa stabilité : les parois extérieures mais aussi les murs intérieurs, les cloisons, les sols et les plafonds. Le choix des matériaux sera donc crucial dans un bâtiment neuf. Mais attention, la place de l'isolant l'est également. Si l'isolant est placé à l'intérieur, l'inertie des parois extérieures sera moins bien utilisée. Il faudra donc privilégier les procédés de construction permettant de placer l'isolant à l'extérieur. Il faudra également favoriser les choix architecturaux conduisant à une bonne compacité du bâtiment. À volume et composition de parois identiques, la forme d'un bâtiment influence directement sa conductance thermique globale ainsi que le montre la comparaison suivante.

Imaginons deux bâtiments comportant chacun 12 niveaux de 900 m², l'un disposé selon un plan carré de 30 m par 30 m et l'autre, de forme plus allongée, de 15 m par 60 m. Ces deux bâtiments ont donc un même volume et, par conséquent, une même capacité d'accueil d'archives. Mais le second présente une surface extérieure de 6 300 m² contre seulement 5 400 m² pour le bâtiment à plan carré. Il coûtera donc plus cher à la fois lors de la construction mais aussi lors de l'exploitation puisque, toutes choses égales par ailleurs, ses parois extérieures entraîneront une consommation supérieure de 17 %. Enfin, du point de vue de la stabilité thermique, cette conductance plus grande du second bâtiment se traduira par une performance moindre !

Il ressort de ce qui précède que l'inertie et l'isolation thermiques associées à la compacité des constructions, constituent les points clés sur lesquels l'étude architecturale et technique doit porter. L'optimisation des choix entre les trois facteurs cités n'est pas

³⁸ La conductance thermique globale d'un édifice est une grandeur caractérisant le flux énergétique qui traverse son enveloppe. Elle intègre les échanges par conduction à travers les parois (opaques ou vitrées) mais aussi les transferts par ventilation (plus ou moins contrôlés) ainsi que les infiltrations.

forcément aisée d'autant qu'aux considérations de stabilité climatique naturelle du bâtiment qui sont ici mises en avant, doivent se superposer de nombreuses autres contraintes parmi lesquelles il convient de citer celles qui relèvent de l'économie du projet. Ce ne sont pas les moindres ! La plupart du temps, il faudra avoir recours aux outils de simulation évoqués plus haut³⁹ pour explorer le champ des solutions possibles et faciliter la recherche de celles qui représentent les meilleurs compromis.

Ce qui vient d'être évoqué concerne les choix globaux du parti architectural. Mais la conception d'un bâtiment nécessite tout un ensemble d'autres décisions qui, pour certaines, influencent sensiblement le bon fonctionnement des magasins d'archives notamment sur le plan du contrôle climatique. Ainsi, il apparaît judicieux de prévoir un sas à l'entrée de tous les magasins. Outre l'intérêt fonctionnel qui peut être trouvé à une telle disposition architecturale, on doit insister sur son rôle bénéfique en termes de protection du climat intérieur des espaces de conservation. Un sas impose l'ouverture successive de deux portes⁴⁰, mais présente l'avantage majeur de limiter considérablement les apports ou déperditions thermo-hydriques du magasin. Par ailleurs, si les magasins sont maintenus en surpression (voir paragraphe « La question de la diffusion de l'air dans les magasins », page 95), le sas facilitera la gestion aéraulique du traitement d'air mis en place. En définitive, il participera à l'amélioration des conditions de conservation des collections tout en réduisant les consommations énergétiques.

Faut-il prévoir des baies vitrées dans les magasins ?

Fenêtre, baie, croisée, tabatière, imposte, œil-de-bœuf, lucarne, oculus, vasistas... Adapté à une grande richesse typologique, le vocabulaire ne fait pas défaut pour désigner de manière appropriée une ouverture vitrée ménagée dans un édifice. Mais, s'agissant des magasins de conservation d'archives, la question qui se pose n'est pas de

³⁹ Voir note 35, page 47.

⁴⁰ Dans le contexte d'un bâtiment d'archives, cette tâche peut être aisément automatisée. Outre la facilité de travail offerte ainsi aux agents, une gestion automatique de l'ouverture des portes (par lecture à distance d'un badge d'habilitation notamment) garantit que les espaces de conservation demeurent en permanence fermés en dehors des temps d'accès, exigence importante pour la stabilité climatique des magasins.

nature lexicale. Elle revêt un caractère proprement fonctionnel : faut-il, oui ou non, y prévoir des ouvertures vitrées ?

Plusieurs arguments sont régulièrement avancés en faveur du maintien ou de la réalisation d'ouvertures vitrées dans les magasins d'archives⁴¹ :

- l'éclairage naturel est important pour le confort des magasiniers ;
- les ouvertures autorisent une ventilation naturelle de secours en cas de défaillance des équipements techniques du bâtiment ;
- elles s'avèrent très utiles en cas d'inondation dans un magasin ;
- la lumière naturelle contribue à l'assainissement biologique des collections.

Que ces arguments soient fondés ou non importerait peu s'ils n'avaient des conséquences sur la conception des bâtiments d'archives et leur stabilité thermohygro-métrique et, par conséquent, sur la bonne conservation des documents. La récurrence de cet argumentaire impose donc d'en discuter le bien fondé de manière détaillée.

L'éclairage naturel est-il indispensable ?

Il est admis de considérer que les magasins d'archives ne sont pas des lieux de travail permanent. Bien qu'il semble ne pas exister de statistique sur les temps réels d'occupation des locaux de conservation par le personnel de magasinage, on peut certainement affirmer que ce temps est très variable d'un magasin à l'autre, d'un établissement d'archives à l'autre. Selon des estimations faites en fonction de l'effectif réel de magasiniers de plusieurs sites dont les responsables ont été interrogés, ce temps d'occupation peut être évalué à un total de 0,5 heures par jour ouvrable et par magasin. L'ordre de grandeur du temps annuel d'occupation doit donc être voisin d'une centaine d'heures. Sachant qu'une baie vitrée est source de perturbations énergétiques⁴² pour un espace clos, il est donc légitime de

⁴¹ Tous les développements qui suivent concernent strictement les magasins de conservation. La présence de baies vitrées dans les autres locaux, y compris les circulations, ne pose en général aucun problème.

⁴² Ces perturbations sont liées d'une part à la faible résistance thermique d'un vitrage, même s'il est « isolant », en regard d'une paroi opaque de même surface et, d'autre part, à la transparence radiative du verre qui se laisse traverser par le rayonnement de courte longueur d'onde (rayonnement visible) mais bloque le

s'interroger sur la nécessité d'un éclairage naturel dans ces lieux de conservation où le temps de présence humaine est de l'ordre de 1 % en moyenne annuelle dès lors que cet éclairage est abondant ailleurs (salle de lecture, bureaux, circulations, etc.).

Une ventilation naturelle de secours est-elle nécessaire ?

L'ouverture de fenêtres pour compenser un système technique défaillant constitue, la plupart du temps, un remède pire que le mal. Par définition, une ventilation naturelle est incontrôlable, à la fois du point de vue des débits d'air et de celui de la qualité de l'air. Au demeurant, la tendance est aujourd'hui à réduire le taux de renouvellement d'air des magasins de conservation. Pour le bâtiment des Archives nationales à Pierrefitte (Seine-Saint-Denis) dont le chantier a commencé au cours de l'été 2009, le taux retenu est de 0,10 volume par heure. C'est précisément cette valeur qui est recommandée désormais par la direction des Archives de France [DAF, 2009] :

« Un renouvellement d'air naturel de 0,10 volume par heure en moyenne avec une filtration de l'air permettra d'une part d'éliminer les polluants internes émis par les collections et leur conditionnement (matériaux acides notamment), et d'autre part d'empêcher toute introduction de poussière ou de produits nocifs aux documents dans les magasins (polluants gazeux, contaminants biologiques). »

Si l'absence d'apport d'air neuf dans un magasin pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours, à la suite d'une panne, ne peut avoir aucune conséquence dommageable pour les collections, il n'en va pas de même si une fenêtre, même de taille modeste, était laissée ouverte⁴³. De 0,1 volume par heure assuré par la ventilation mécanique, le taux de renouvellement passerait très aisément à plusieurs volumes par heure, avec tous les risques de déstabilisation thermique et hydrique, sans compter ceux de pollution, qui s'ensuivraient pour les collections.

rayonnement de grande longueur d'onde (rayonnement infrarouge). Ce phénomène porte un nom désormais bien connu : l'*effet de serre*.

⁴³ De même qu'une canalisation *a priori* étanche, est appelée, inéluctablement, à fuir, une baie *ouvrable* demeurera un jour ou l'autre anormalement *ouverte*.

Un ouvrant est-il justifié pour assainir un magasin inondé ?

La possibilité de ventiler un local après un dégât des eaux est également l'une des justifications fréquemment avancées pour défendre l'intérêt d'ouvrants dans les magasins de conservation. Cet argument est-il recevable ? Tout d'abord, examinons les origines possibles d'un sinistre impliquant l'eau dans un magasin. Quatre causes principales doivent représenter la presque totalité des cas avérés : une inondation, une canalisation endommagée, des infiltrations par les parois (principalement la toiture), le déclenchement intempestif d'un dispositif d'extinction automatique d'incendie. Il s'agit à chaque fois d'évènements dont la manifestation, pour n'être pas impossible, doit demeurer assez rare si les règles de base de bonne construction ont été respectées.

Pour le rôle que peut jouer un ouvrant en cas de sinistre, un scénario d'inondation sera proposé. Il sera alors démontré que l'ouverture d'une baie ne constitue pas une solution efficace d'assèchement notamment au printemps et en été. En hiver, période où elle est théoriquement envisageable, elle suppose la mise en œuvre irréaliste d'un dispositif complémentaire de chauffage capable d'une part de compenser les échanges thermiques du magasin ouvert sur l'extérieur et, d'autre part, de fournir l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau répandue.

Le scénario proposé est celui d'une inondation très modérée conduisant à la présence d'un film d'eau de 1 mm d'épaisseur sur toute la surface (200 m^2) d'un magasin. Le volume d'eau répandu est donc de 200 litres. Si le renouvellement de l'air est faible, l'humidité relative dans le magasin peut s'approcher de 100 %. Supposons qu'une baie d'une superficie de 1 m^2 soit ouverte sur l'extérieur. Un échange d'air va se produire. L'air extérieur pénétrant dans le magasin ne pourra contribuer à l'assécher que si son rapport de mélange est inférieur à celui de l'air intérieur du magasin qui, après l'inondation, sera proche de la saturation. Posons l'hypothèse que la température du magasin est réglée à $18 \text{ }^\circ\text{C}$ et que son humidité relative s'est élevée à 95 % après le sinistre. Ces conditions thermohygro-métriques correspondent à un rapport de mélange d'environ $12 \text{ g}_v/\text{kg}_{as}$. Si le rapport de mélange de l'air extérieur est supérieur à cette valeur, aucun séchage ne peut être attendu. Dans une ville comme Strasbourg, par exemple, une telle situation se rencontre plus de 150 jours par an comme le montre la **Figure 18**,

Choisissons un moment de l'année, en hiver, où un séchage serait a priori possible et postulons une température extérieure de 0 °C et une humidité relative extérieure de 80 %. Ces conditions correspondent à un rapport de mélange de 3 g_v/kg_{gas}.

En l'absence de vent frappant la façade, le débit d'air échangé ne dépendra que de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et de la géométrie de la baie. Le débit d'air échangé entre l'intérieur et l'extérieur peut être estimé à 1,2 m³/s avec une durée d'assèchement atteignant 6 heures. Cependant, deux conditions impératives doivent être satisfaites. La première impose que le refroidissement du local provoqué par l'entrée d'air extérieur soit thermiquement compensé. Si ce n'était pas le cas, très rapidement, le local serait ramené à la température extérieure et l'échange aéraulique serait stoppé. L'énergie à fournir pour cette compensation peut être évaluée à 29 kW. Deuxième condition : l'évaporation de l'eau est un processus endothermique, en d'autres termes, il absorbe de l'énergie. L'apport thermique à fournir pendant toute la durée du séchage correspond à une puissance de 22,7 kW. Au total, il ne suffit donc pas d'ouvrir la fenêtre ! Une puissance thermique supérieure à 50 kW est indispensable pour être certain de réaliser le séchage dans le temps théorique évalué à 6 heures. Si cette énergie n'est pas fournie, ce qui est le cas le plus probable, le maintien de l'ouverture de la fenêtre se traduira par un refroidissement brutal du magasin aussi dangereux pour les collections que l'est l'excès d'humidité et le processus de séchage s'étalera sur un temps considérablement plus long.

Ces résultats prouvent qu'on ne saurait justifier la réalisation d'ouvertures dans un magasin, disposition coûteuse, au prétexte qu'elle serait un remède dont l'efficacité s'avère plus que douteuse, à des sinistres dont la probabilité est très faible. Il serait infiniment plus rationnel et sécurisant d'inclure de tels dans un plan d'urgence, moyennant la définition dans ce cadre, de procédures d'intervention adaptées à la fois à la nature des incidents ou accidents, à leur ampleur potentielle. Par ailleurs, si de tels sinistres se produisaient malgré tout, par malchance, négligence ou malveillance, il serait toujours possible de mettre en œuvre provisoirement des moyens techniques propres à assécher efficacement les locaux concernés (déshydrateurs industriels mobiles, par exemple).

L'éclairage naturel a-t-il un impact favorable en matière de protection biologique ?

Le dernier argument souvent brandi en faveur des ouvertures vitrées dans les magasins repose sur le pouvoir germicide de la lumière. Ainsi, dans une publication déjà

ancienne⁴⁴, sous la signature de Michel Duchein, on trouve cette phrase : « *Il ne faut pas [...] négliger le fait que les rayons ultraviolets de la zone inférieure du spectre (au-dessous de 300 millimicrons⁴⁵) ont un fort pouvoir germicide et fongicide et qu'à ce titre il est dangereux de les exclure totalement des bâtiments d'archives* ».

Les biologistes n'ignorent pas le rôle létal du rayonnement ultraviolet mais leurs expériences montrent que le pic d'absorption des acides nucléiques formant l'ADN au sein des cellules des micro-organismes se situe à 260 nanomètres. C'est la raison pour laquelle les lampes UV utilisées pour la désinfection dans les laboratoires ou les hôpitaux génèrent un rayonnement dont le spectre radiatif est centré sur cette longueur d'onde.

Or, le rayonnement UV provenant du soleil est filtré par la couche d'ozone stratosphérique et ne contient plus aucun rayonnement dit UV-C correspondant à la plage spectrale 180-280 nm. Pour ce qui concerne les UV-B (plage 280-320 nm) dont l'effet biologique est essentiellement érythrogène⁴⁶, ils sont retenus par l'atmosphère dans une proportion qui dépasse 95 %. Autrement dit, le pouvoir germicide du rayonnement solaire à la surface de la planète est pratiquement nul. Ajoutons que le pouvoir de pénétration du rayonnement UV est très faible. Il ne peut agir qu'à la surface d'un objet. Des micro-organismes situés sous une couche de poussière ne risquent rien ! Et que dire de ceux situés dans une boîte d'archives⁴⁷, voire à l'intérieur d'une liasse... Enfin, les doses de rayonnement UV-C nécessaire pour tuer 99,9 % des germes présents sur une surface doivent atteindre une intensité de 40 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Cette valeur est 10 000 fois plus grande que l'intensité du rayonnement UV global traversant un vitrage non filtrant. L'unique moyen par lequel le rayonnement lumineux pourrait inactiver (et non détruire) des spores en

⁴⁴ P. WALNE, coord. – *Techniques modernes d'administration des archives et de gestion des documents : recueil de textes*, Unesco, Paris, 1985.

⁴⁵ L'appellation « millimicron » est désormais inusitée. On parle aujourd'hui de nanomètres (« nm » en abrégé). La plage spectrale inférieure à 300 nm mentionnée par l'auteur correspond aux UV-C.

⁴⁶ La superposition des spectres d'absorption de l'ADN cellulaire et du rayonnement UV-B atteignant la surface de la planète montre une petite zone de recoupement. Cela signifie qu'on ne peut exclure une influence des UV-B sur l'intégrité génétique des cellules. Ceci permet d'expliquer en partie les mécanismes d'apparition de cancer de la peau.

⁴⁷ Dans la plupart des opérations de construction d'un bâtiment d'archives, le déménagement a été précédé d'une campagne de conditionnement des documents.

latence ou en cours de développement est l'assèchement. En cas d'exposition à la lumière directe (solaire ou non, du moment qu'elle provoque un échauffement topique suffisant), les micro-organismes pourraient être desséchés et, conséquemment, ne plus pouvoir se développer. Or, comme cela sera rappelé plus loin, il convient de tenir compte des dangers de l'exposition directe à la lumière... Le rôle sporicide et germicide de la lumière naturelle pénétrant dans un magasin d'archives par les ouvertures vitrées est donc à classer définitivement dans la grande famille des mythes...

En résumé, aucun argument fonctionnel ne plaide véritablement *pour* la création d'ouvertures vitrées. À l'inverse, de sérieux arguments militent *contre* cette option architecturale. Le premier est d'ordre économique.

Impact économique d'une baie vitrée

Le coût d'une baie est nettement plus élevé que son équivalent en surface réalisé en paroi opaque. Ceci est vrai pour la construction mais l'est davantage encore pendant l'exploitation d'un bâtiment. En effet, le coefficient de transmission thermique d'une baie, même équipée d'un vitrage isolant, est beaucoup plus élevé, d'un facteur 10 environ, que celui d'une paroi opaque. Ceci se traduit donc par des déperditions thermiques plus élevées en hiver ainsi que par des apports plus grands en période estivale, même si une protection contre le rayonnement solaire est mise en place. Pour maintenir la stabilité thermique requise pour une bonne conservation, ces déperditions et ses apports devront être compensés par les équipements techniques du bâtiment d'où il résultera un accroissement sensible des consommations énergétiques et donc des coûts d'exploitation.

Il est légitime de vouloir tenir compte des coûts supplémentaires qu'induit la nécessité d'une consommation plus élevée de l'éclairage artificiel dans le cas où les magasins sont aveugles. Compte tenu des temps d'occupation très courts des magasins, le surcoût est cependant largement inférieur aux économies réalisées sur le chauffage et éventuellement la climatisation. Notons qu'en termes de luminaires, les dépenses d'investissement sont identiques selon les deux hypothèses, la présence d'ouvertures vitrées ne permettant pas de faire l'économie de l'installation d'un éclairage artificiel.

Impact en matière de stabilité thermique et hydrique

Aucune baie ouvrante n'est parfaitement étanche à l'air. Si le magasin de conservation est naturellement (via l'action du vent) ou mécaniquement (par l'effet d'un système de ventilation) mis en dépression par rapport à l'extérieur, alors, de l'air extérieur pénétrera inéluctablement dans le local, provoquant une perturbation plus ou moins grande de son équilibre thermique et hydrique en fonction du débit parasite entrant. L'air extérieur contient *toujours* de la vapeur d'eau⁴⁸, en proportions très variables il est vrai, ainsi que des substances dangereuses pour les fonds et collections. Une baie ouvrante constitue donc une contrainte, sinon un danger, du point de vue de la conservation des archives.

Impact du point de vue photochimique

Autre danger : celui de l'altération des documents par le rayonnement ultraviolet. Si le pouvoir germicide du rayonnement UV pénétrant dans un local n'a jamais été établi, en revanche, le potentiel destructeur de ce rayonnement sur le papier est parfaitement démontré. L'énergie d'un photon d'UV-A est de l'ordre de grandeur de l'énergie de liaison des polymères de cellulose. Une feuille de papier recevant une grande quantité de rayonnement solaire non filtré va donc connaître un vieillissement accéléré.

Un bon remède consiste à équiper les baies des espaces où des documents d'archives sont appelés à séjourner (salle de tri, atelier de reliure, salle de consultation et, le cas échéant, magasin de conservation) de vitrages feuilletés. L'intercalaire en butyral de polyvinyle assurant l'assemblage mécanique des composants verriers dans les vitrages feuilletés possède en effet la propriété d'absorber la plus grande partie des ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire incident. Mais, même débarrassé de sa fraction la plus nocive, le rayonnement entrant dans les locaux conserve une partie de son pouvoir nuisible pour les documents via son impact thermique. Pénétrant sous forme d'un rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde, l'énergie associée à l'irradiation solaire sera plus ou moins rapidement absorbée par les matériaux opaques présents dans le local, puis transformée en chaleur⁴⁹. Celle-ci contribuera à réduire la durabilité des

⁴⁸ Selon les moments, l'air extérieur peut être plus « sec » que l'air intérieur ou plus « humide » au sens où son rapport de mélange (→ LEXIQUE) est plus élevé ou plus faible.

⁴⁹ On retrouve l'*effet de serre* expliqué dans la note 42, page 9.

documents en accroissant la cinétique des réactions chimiques affectant les chaînes de cellulose des matériaux constitutifs des fonds et collections.

Le recours à des stores – de préférence extérieurs – sera-t-il suffisant pour traiter le problème ? Tout d’abord, précisons que *toutes* les fenêtres devront être équipées d’un store. La géométrie du rayonnement solaire est telle qu’aucune orientation ne permet de garantir qu’une baie particulière ne recevra jamais le soleil. Même orientée au nord, une ouverture vitrée peut être irradiée si l’horizon est dégagé. Il n’y a guère qu’en zone urbaine dense qu’une ou plusieurs façades peuvent être totalement préservées de l’irradiation solaire par la présence d’immeubles voisins. Cependant, si l’option d’un store était retenue, le choix risquerait d’être très difficile. En effet, un store efficace est un store laissant pénétrer peu de lumière. Il s’agirait donc d’une option contradictoire avec le souhait de départ d’obtenir un certain niveau d’éclairage naturel.

Ouvrir ou ne pas ouvrir ?

Pour toutes les raisons qui ont été développées plus haut, les ouvertures vitrées dans les magasins de conservation d’archives ne paraissent pas avoir fait la preuve de leur utilité. Si leur intérêt ne peut être démontré, il est donc possible de conclure qu’elles ne sont pas souhaitables ! Il n’en demeure pas moins que le Maître d’ouvrage ou l’utilisateur final, peuvent estimer, pour des raisons plus psychologiques que techniques, que les locaux aveugles sont « inconfortables » et, par conséquent, souhaiter maintenir des percements de façade en dépit des arguments développés. En ce cas, les recommandations les plus cohérentes avec les développements qui précèdent seraient de faire en sorte que ces ouvertures soient les plus petites possibles en surface afin de minimiser l’impact thermique, et non ouvrantes de telle sorte qu’il ne se produise pas d’infiltrations parasites. De toutes les façons, ces ouvertures, si elles étaient imposées dans un projet, devraient être réservées aux magasins où les collections sont, sans exception, conditionnées dans des boîtes de conservation.

Ce point est suffisamment important pour figurer dans le programme de construction du bâtiment. Ceci contraint les décideurs à prendre parti sur ce sujet aux multiples facettes avant que les maîtres d’œuvre ne soient consultés.

Influence des collections

Grâce à leur masse importante⁵⁰, les archives jouent un rôle essentiel dans l'évolution à court terme du climat intérieur des magasins, tant du point de vue thermique qu'hydryque. Dès l'introduction, il a été montré que le contenu en eau de l'air d'un magasin d'archives et le contenu en eau des archives elles-mêmes, étaient dans un rapport qui pouvait aller de un à mille. Il n'est donc pas surprenant qu'on observe une grande constante de l'humidité relative dans tous les magasins où l'introduction d'air neuf par la ventilation demeure faible et où les infiltrations restent à un faible niveau.

Examinons la **Figure 14**.

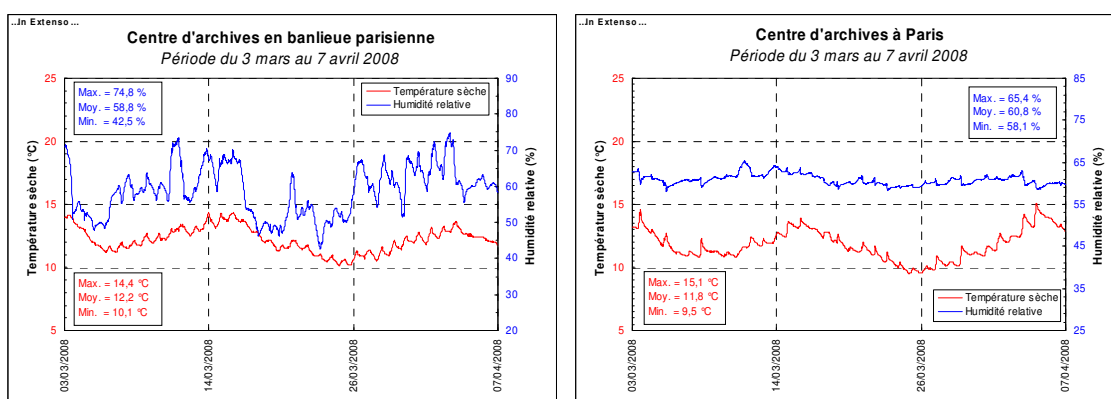


Figure 14 – Comparaison des données climatiques intérieures de deux centres d'archives.

Comme on peut le vérifier sur la **Figure 14**, la période de suivi est la même dans les deux cas examinés. La localisation des bâtiments (Paris et sa banlieue) permet d'admettre que la sollicitation du climat extérieur a été sinon identique, tout du moins très semblable. Or, qu'observe-t-on ? Les graphes de la température dans les deux édifices sont pratiquement superposables. Les deux moyennes ne diffèrent que de 0,4 °C. Ce résultat est d'autant plus intéressant que, dans le cas du bâtiment parisien, il s'agit d'un édifice ancien, tandis que l'autre est une construction récente. L'examen de l'évolution de l'humidité relative permet de constater que les évolutions sont, cette fois-ci très contrastées. De manière remarquable, les moyennes sont là-encore pratiquement identiques, à 2 % près, un

⁵⁰ Les chiffres proposés dans l'introduction donnent comme ordre de grandeur une masse de 65 tonnes dans un magasin de 200 m².

écart peu significatif compte tenu des incertitudes de mesures. En revanche, les fluctuations sont notablement différentes. Dans le magasin parisien, l'humidité relative varie entre 58 et un peu plus de 65 % (valeurs extrêmes). Dans le magasin situé en grande banlieue, l'écart entre le maxima et le minima dépasse 30 % ! Le rapport entre les amplitudes observées est proche de 5.

Comment expliquer ces différences de comportement du point de vue hydrique ? L'explication est très simple. Le bâtiment parisien, dans lequel la stabilité de l'humidité relative est la meilleure, est, paradoxalement, dépourvu de tout équipement de chauffage ou de ventilation, ce qui n'est pas le cas du bâtiment situé en banlieue. De fait, son équipement de régulation étant en panne, l'air extérieur est envoyé sans correction thermique et hydrique dans le magasin, provoquant une déstabilisation totale de l'humidité relative. Dans le magasin parisien, l'absence de traitement d'air permet aux archives de « s'autoréguler » en quelque sorte, tandis que la ventilation forcée du magasin de banlieue l'interdit.

Ce cas limite, presque pathologique pour ce qui concerne le magasin de banlieue, permet de comprendre à quel point il est important de limiter la ventilation à des valeurs les plus basses possibles compatibles avec l'occupation réelle des lieux. La tendance *naturelle*⁵¹ des archives à réguler l'humidité relative des espaces qui les abritent⁵² peut être compromise gravement par un renouvellement d'air trop important ou mal ajusté sur le plan climatique.

Le rôle des conditionnements

Si le bâtiment constituait une première ligne de défense vis-à-vis du climat extérieur, on peut considérer que les boîtes de conditionnement des archives forment la garde rapprochée. De fait, les fonctions attribuées aux contenants d'archives sont multiples : faciliter la manutention, protéger contre la poussière et contre la lumière, créer un microclimat autour d'un ensemble de documents. C'est ce dernier rôle qui sera examiné ici.

⁵¹ Le terme de « naturelle » utilisé ici rappelle que l'équilibre hydrique des archives est commandé par des lois physiques. C'est ce sens qu'il faut entendre dans le titre du célèbre ouvrage de Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* publié au XVIII^e siècle. Cette « philosophie naturelle » n'est rien d'autre que ce qu'on appelle aujourd'hui la physique.

⁵² Les mécanismes de cette autorégulation sont expliqués en détail dans l'annexe « Le comportement thermohygro-métrique du papier » en page 129.

À l'instar des matériaux constitutifs des archives, ceux utilisés pour créer des contenants sont très variés : carton, polypropylène, polyéthylène téréphtalate, métal, bois, etc. Quelle que soit leur nature, leur aptitude à créer un microclimat tient, pour l'essentiel, à ce que ces contenants forment, tout comme les bâtiments, une frontière entre deux espaces. Cette frontière possédant certaines propriétés d'inertie (tant du point de vue thermique qu'hydrique), il s'ensuit que le climat intérieur du contenant est nécessairement plus stable que celui de l'environnement immédiat. C'est au demeurant ce qu'on observe.

Les figures suivantes ont été établies en plaçant 500 feuilles A4, d'un grammage de 80 g/m², représentant une masse d'environ 2,5 kg de papier, dans une boîte d'archives du commerce fabriqué à partir de carton de conservation. Deux enregistreurs numériques de la température et de l'humidité relative dûment étalonnés ont été utilisés. L'un a été placé dans la boîte contenant le papier, le second a été placé dans son voisinage immédiat.

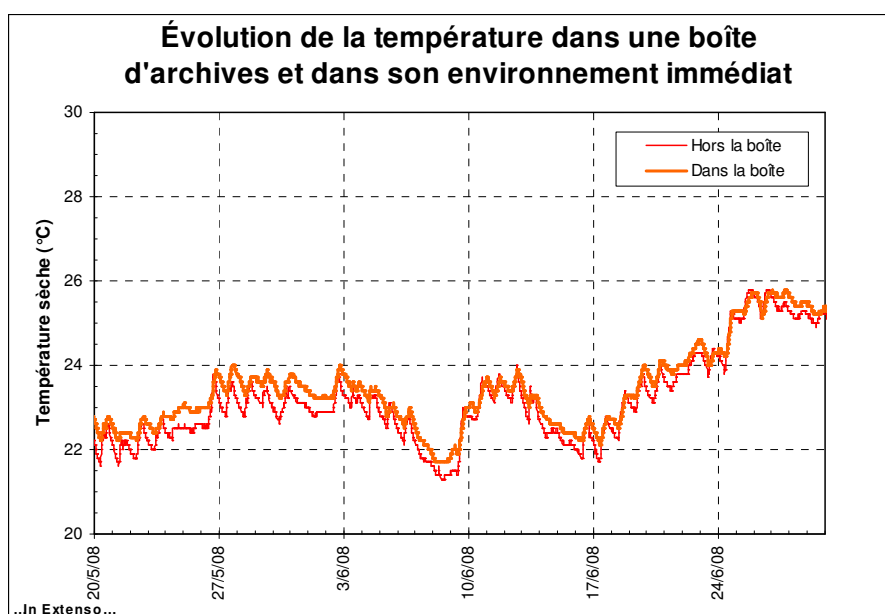


Figure 15 – Évolution de la température dans et hors la boîte.

Sur la période considérée de 40 jours, on observe peu de différences entre l'évolution de la température dans et hors la boîte. L'analyse détaillée des enregistrements permet de déceler cependant un léger effet d'inertie. En effet, la moyenne des variations quotidiennes se situe à 0,5 °C par jour dans la boîte tandis qu'à l'extérieur de celle-ci, cette fluctuation atteint, toujours en moyenne, 0,7 °C. Mais c'est l'effet hydrique qui s'avère le plus spectaculaire comme le montre la **Figure 16**.

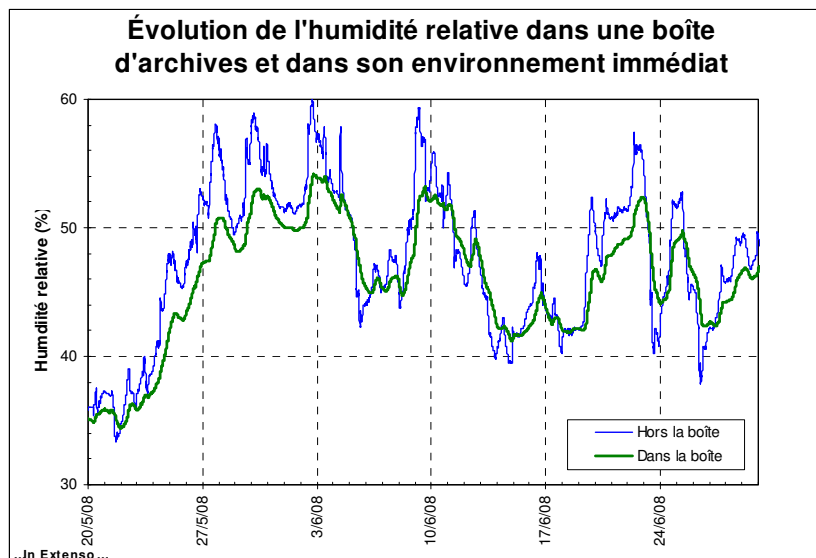


Figure 16 – Évolution de l’humidité relative dans et hors la boîte.

Le simple examen visuel de la figure montre que la boîte permet l’apparition d’un effet tampon très marqué à l’échelle journalière. Le tableau suivant permet de comparer les écarts quotidiens $\Delta\epsilon$ de l’humidité relative dans et hors la boîte.

$\Delta\epsilon$	Hors la boîte	Dans la boîte
Maximum	16,3 %	8,2 %
Moyenne	5,7 %	2,6 %
Minimum	0,7 %	0,2 %
Nb mesures < 5 %	45 %	92 %

Tableau 3 – Statistiques sur les écarts journaliers constatés de l’humidité relative dans et hors la boîte.

On peut estimer que la présence du conditionnement diminue d’un facteur 2 la fluctuation subie de l’humidité relative et cela sans autre précaution que l’utilisation d’une boîte standard d’archives.

Influence des facteurs d’occupation et des équipements techniques

Pour prépondérantes qu’elles soient, les fluctuations du climat extérieur ne sont pas les seules perturbations que supportent les magasins de conservation. Il n’est pas sans intérêt d’évaluer l’ordre de grandeur des autres facteurs qui peuvent influencer les

conditions thermohygro-métriques intérieures. Trois peuvent être citées : l'occupation humaine, l'éclairage artificiel et les équipements techniques conçus pour la régulation du climat intérieur.

Influence de l'occupation humaine

À l'instar de tous les mammifères, l'homme dispose d'un système de régulation thermique interne sophistiqué. Les exigences de ses fonctions biologiques imposent que sa température corporelle demeure constante, autour d'une valeur très voisine de 37 °C. Ceci le contraint à évacuer en permanence une quantité variable de chaleur, correspondant à son métabolisme interne, afin d'assurer son indispensable homéothermie. Ce métabolisme dépend essentiellement de son activité physique. Pour un individu moyen⁵³, celui-ci s'établit sur une plage très large partant de 80 W lorsqu'il est au repos, à 900 W s'il court à une vitesse de 15 km/h. Un magasinier développera un métabolisme moyen de 200 W. Cette puissance (→ LEXIQUE) est émise sous une forme sensible (chaleur) et latente (humidité) selon une répartition qui dépend de la température et de l'humidité des locaux. En supposant que les conditions climatiques des magasins de conservation soient de 18 °C et 50 %, la part sensible sera de 118 W et la part latente de 82 W. Cette fraction latente correspond à la vapeur d'eau produite et rejetée par l'individu via la respiration et la perspiration⁵⁴. Elle peut être évaluée à 110 grammes de vapeur d'eau par heure.

En valeur absolue, ces chiffres doivent être mis en proportion du temps moyen d'occupation humaine dans un magasin de conservation. Pour une journée-type, l'occupation humaine évaluée sur la base des chiffres cités précédemment, soit un temps d'occupation évalué à 0,5 heures par jour ouvrable, se traduit par un apport sensible moyen de 0,06 kWh. Pour ce qui concerne l'apport latent sous forme de vapeur d'eau, il peut être estimé à une valeur moyenne de 55 grammes par jour, soit moins que le contenu en eau d'un kilogramme de papier en équilibre hydrique avec le magasin ! S'ils ne sont pas négligeables en valeur absolue, ces chiffres pèsent bien peu en valeur relative. Par conséquent, la plupart du temps, ces apports anthropiques pourront être négligés.

⁵³ On se base sur un adulte de taille moyenne dont la surface de peau est de 1,7 m².

⁵⁴ La perspiration est l'émission de vapeur d'eau par la peau. Aux valeurs citées de la température et de l'humidité relative, on suppose qu'il n'y a pas de transpiration.

Influence de l'éclairage artificiel.

Commençons par énoncer quelques hypothèses raisonnables :

- l'éclairage artificiel ne fonctionne que pendant le temps d'occupation⁵⁵ ;
- le niveau d'éclairement ne dépasse pas 200 lux, en tout point du magasin et toute position des rayonnages mobiles, comme le recommande la Direction des Archives de France [DAF, 2009] ;
- l'éclairage est réalisé au moyen de tubes fluorescents ; la puissance installée est de l'ordre de 5 W/m² soit, pour un magasin de 200 m², une puissance de 1 kW.

Sur la base de telles hypothèses, l'apport thermique de l'éclairage peut être estimé à 0,5 kWh par jour ouvré, soit une valeur huit fois supérieure à celle liée à la présence humaine. Il semble donc difficile de négliger ces chiffres mais il appartient au bureau d'études de décider de les intégrer ou non à sa simulation⁵⁶.

Influence des équipements de chauffage et/ou climatisation et de la ventilation.

À quoi servent les équipements de chauffage et/ou de climatisation ? À corriger les conditions intérieures d'un espace qui, sans leur action, verrait sa température et/ou son hygrométrie dériver en deçà ou au-delà des valeurs souhaitées sous l'effet des variations climatiques extérieures ou des perturbations intérieures. Il est donc dans la nature fonctionnelle même de ces équipements technique d'influencer les conditions d'ambiance dans les locaux pour lesquels ils ont été conçus et installés. Aussi bien, ce n'est pas sur cette influence première – intrinsèquement bénéfique – qu'il convient d'insister mais bien sur un effet secondaire qui est pour le moins, fâcheux. Cet effet est lié à la nécessité de *réguler* le fonctionnement des équipements techniques. Qu'est-ce que cela signifie ? Supposons que

⁵⁵ Il est aisé de s'assurer qu'une telle hypothèse qui correspond à la fois à une exigence de bonne conservation et à un impératif d'économie d'énergie, est vérifiée en imposant dans le projet un dispositif d'allumage temporisé fondé sur la détection de présence. Le surcoût d'un tel équipement est très rapidement amorti par les économies d'exploitation induites.

⁵⁶ L'ordre de grandeur des chiffres ne permet pas cette fois-ci de décider *a priori* si ces chiffres peuvent être ou non négligés. En effet, si le bâtiment est très isolé, un apport thermique par l'éclairage peut se traduire par un effet thermique perceptible. Lorsqu'on réalise des simulations, il peut être utile de faire deux calculs comparatifs pour examiner la sensibilité du bâtiment à ce type d'apports.

L'objectif soit de maintenir 18 °C dans un local. S'il est acquis que ce local subira des perturbations importantes, il conviendra de l'équiper d'un système capable de le chauffer ou de le rafraîchir. Pour savoir si ce local a besoin d'être chauffé ou rafraîchi, une sonde de température reliée à un dispositif électronique spécial désigné sous l'appellation générique de *régulation* doit être installée. Tout ceci peut être résumé par le schéma suivant :

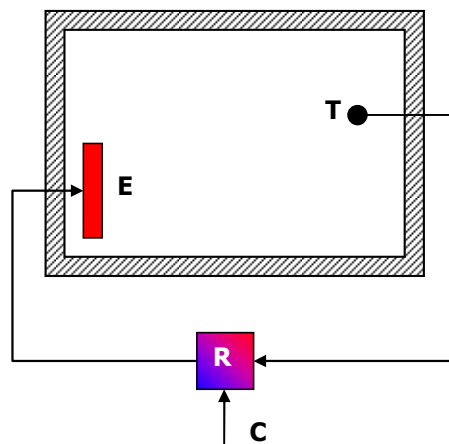


Figure 17 – Schéma de principe d'une régulation.

L'ensemble des opérations de régulation va consister à mesurer la température (T), transmettre l'information à un régulateur (R) auquel on a préalablement indiqué la température (C) à maintenir dans le local (*température de consigne*). Le régulateur va réaliser une comparaison entre la valeur mesurée et la valeur de consigne. Si la valeur mesurée est inférieure, le régulateur va commander à l'émetteur (E) de fournir de l'énergie thermique ou frigorifique au local selon les besoins. Lorsque la température de consigne sera atteinte, il commandera l'arrêt de l'émission. Et ainsi de suite.

L'exemple décrit est d'une extrême simplicité mais il reproduit les principes fondamentaux de toute régulation : mesure de la grandeur à contrôler, comparaison, décision, action, contrôle de telle sorte que le paramètre surveillé (température, hygrométrie ou autres) demeure aussi proche que possible de la valeur de consigne choisie par l'utilisateur, quelles que soient les perturbations qui peuvent affecter le paramètre. De ce qui précède, il est aisé de comprendre que **l'idée même de régulation suppose que la grandeur contrôlée subit des variations puisque c'est la détection de ces variations qui va induire une action déclenchée par le régulateur**. De fait, un local peut être considéré comme un système physique naturellement instable dont la température

intérieure ne peut demeurer constante à cause des variations extérieures du climat et des perturbations intérieures. Une régulation est donc un dispositif tentant de maintenir l'équilibre d'un système en dépit des sollicitations qu'il supporte, à la manière d'un pilote qui tente de maintenir son aéronef sur un cap constant malgré les variations du vent tant en direction qu'en intensité. Cependant, selon le type de la régulation et la finesse des réglages qu'elle aura reçus de la part des metteurs au point de l'installation technique, l'écart instantané entre température réelle observée dans le local et consigne (valeur recherchée) peut être plus ou moins grand. Dans certains cas, les écarts constatés dus à la régulation sont plus importants que ceux qui se seraient produits en l'absence de toute régulation ! En d'autres termes, le système censé corriger les variations que subit un local devient la source principale des perturbations⁵⁷. Tel est l'effet secondaire qui était évoqué. Or, il ne faut pas s'y tromper, ce cas de figure est beaucoup plus fréquent qu'on ne l'imagine. Il existe des types de régulation et des méthodes de calcul associées à ces régulations, qui permettent d'optimiser le réglage des installations techniques complexes. Ainsi, lorsqu'elles sont correctement réglées, les régulations classiques de type PID (→ LEXIQUE) ou les régulations prédictives, plus innovantes, constituent d'excellentes solutions pour le pilotage des systèmes de traitement d'air des magasins d'archives.

Avec la **Figure 14**, on a vu également que le dysfonctionnement d'un système technique (panne d'un humidificateur, par exemple) peut conduire à des variations des paramètres climatiques intérieurs très dangereuses pour les fonds et collections abrités dans les magasins.

Dans le chapitre suivant, les différents systèmes de contrôle du climat utilisables dans un bâtiment d'archives seront rapidement passés en revue. À cette occasion seront rappelées les précautions à prendre pour que le remède, à savoir les dispositifs techniques, ne devienne pas pire que le mal, autrement dit les perturbations, qu'ils sont censés compenser.

⁵⁷ Dans le chapitre suivant, des exemples de cette situation paradoxale et au demeurant inacceptable, seront illustrés.

Chapitre 4

Faut-il climatiser les magasins d'archives ?

Les chapitres précédents ont permis de voir combien le papier et, d'une manière générale, la plupart des matériaux constitutifs des archives, étaient sensibles aux variations de la température et de l'humidité relative de l'air. Il a été également observé que si les paramètres du climat extérieur fluctuaient dans des proportions considérables, les bâtiments, pour autant qu'ils aient été bien conçus et bénéficiaient donc de bonnes propriétés d'inertie, étaient en mesure de filtrer de manière efficace les variations rapides du climat, typiquement celles qui se produisent à l'échelle journalière⁵⁸. Cependant, ce rôle de régulation du bâtiment, peut s'avérer insuffisant, soit que les propriétés thermophysiques de la construction sont insuffisantes, soit parce que les exigences climatiques intérieures sont élevées. Une question importante se pose alors pour les magasins de conservation...

Faut-il climatiser ?

Jadis, cette interrogation aurait sans doute fait sourire les responsables des constructions de bâtiments d'archives. En effet, pendant très longtemps, la complexité et le coût des installations de climatisation ont paru si élevés que l'usage de ces techniques semblait réservé à des applications exceptionnelles comme en témoigne cet extrait d'une étude publiée il y a plus de cinquante ans dans le *Bulletin des Bibliothèques de France*⁵⁹ :

⁵⁸ Sur ce point, voir le chapitre 3.

⁵⁹ J. BLETON. – « Les magasins à livres dans les bibliothèques françaises du début du XIX^e siècle à nos jours », *Bulletin des Bibliothèques de France*, n° 3, 1956, p. 183-206.

« Le conditionnement d'air, on le sait, est le système le plus perfectionné de chauffage ; faut-il ajouter que c'est également le plus coûteux, tant du point de vue de l'installation que de l'exploitation (frais de consommation et d'entretien, réglage par personnel qualifié). Adopté dans presque toutes les bibliothèques américaines, où il est pour ainsi dire imposé aussi bien par le climat et l'importance des variations hygrométriques que par la présence de lecteurs autorisés à y travailler, il ne peut être recommandé dans nos blocs-magasins, en raison de son coût, que si la nature et la valeur des collections qu'ils abritent l'imposent. »

Plus tard, les choses changent. Parce qu'elle permet, tout du moins en théorie, d'assurer une grande constance des paramètres climatiques intérieurs tout au long de l'année, la climatisation fait des émules. Les exigences formulées dans les cahiers des charges de construction en matière de contrôle de la température et de l'humidité relative sont telles que le recours aux techniques de traitement d'air les plus sophistiquées devient inéluctable.

Il semble qu'aujourd'hui on ait compris que la climatisation n'était pas la panacée vantée par une publicité tapageuse et mercantile, que les avantages qu'elle revendiquait pouvaient être, dans certains cas, largement diminués sinon totalement annulés par ses inconvénients, sinon ses dangers, qui sont loin d'être négligeables⁶⁰. Tant que l'énergie était bon marché, on a laissé construire des bâtiments aberrants sur le plan climatique en confiant aux dispositifs techniques le soin de corriger les fautes conceptuelles des maîtres d'œuvres. De fait, **la climatisation servait alors de remède pour traiter des bâtiments climatiquement malades**, autrement dit mal conçus. La crise aidant, on est revenu à plus de mesure. Il est désormais évident que les concepteurs des bâtiments d'archives ne peuvent plus faire l'économie d'une approche architecturale responsable. Leur premier devoir est de faire en sorte que les fonds et collections qu'ils ont la charge d'abriter demeurent parfaitement protégés. Mais en même temps, la société leur demande d'opérer des choix constructifs et techniques à faible impact sur l'environnement. Cela ne veut pas dire qu'on ne doit plus faire de climatisation mais plutôt qu'il faut sans doute la réserver aux situations pour lesquelles elle est la seule option raisonnable.

⁶⁰ La question des risques sanitaires liés à la climatisation est récurrente et particulièrement controversée. Parmi l'abondante bibliographie consacrée au sujet, on peut citer le chapitre rédigé par S. PARAT et A. PERDRIX : « Climatisation et aérobiocontamination » dans [ROQUEBERT, 2002, pp. 171-185]. Peut être également consulté : N. ROSENBERG. – « Affections respiratoires professionnelles non infectieuses dues aux humidificateurs/climatiseurs », *Documents pour le médecin du travail*, fiche TR44, INRS, 2008. Une autre référence liée à l'actualité sanitaire de l'automne 2009 mérite d'être consultée : V. EZRATY, F. SQUINAZI. – « Virus influenza pandémique à l'intérieur des bâtiments : quel risque de transmission par les systèmes de ventilation ou de climatisation ? », *Environnement, Risques & Santé* – Vol. 7, n° 4, juillet-août 2008, pp. 252-263.

Cette nouvelle sagesse implique de retrouver la simplicité originelle des constructions traditionnelles⁶¹ pour lesquelles le choix des matériaux s'opérait à proximité, dans un environnement aux ressources limitées, tandis que le recours aux techniques était des plus limité. Mais il est vrai que si l'on veut faire simple du point de vue des technologies utilisées tout en imposant des objectifs climatiques intérieurs ambitieux, le processus de conception a toutes les chances d'être plus complexe ! Ceci se traduit par la nécessité de faire appel à des outils de calculs sophistiqués si l'on veut pouvoir disposer d'études de qualité. Ce point a déjà été évoqué dans le chapitre 2, aussi ne sera-t-il pas redéveloppé ici.

Pour conduire une bonne analyse, il importe de suivre un processus de réflexion qui va balayer successivement trois étapes fondamentales. La première consiste à définir les objectifs à atteindre en termes d'exigences climatiques imposées dans les magasins. La deuxième concerne la bonne compréhension du climat extérieur, source principale de perturbations pour les collections à conserver. Enfin, la dernière étape est celle de la définition de l'enveloppe (au sens large) qui doit permettre de maintenir les collections dans les conditions climatiques définies à la première étape, en dépit des fluctuations du climat extérieur. C'est seulement au cours de cette dernière étape que l'étude précise des dispositifs de climatisation sera conduite, s'il s'avère que ces dispositifs sont indispensables. Un examen plus détaillé de ces trois étapes est proposé dans les paragraphes qui suivent.

Les exigences climatiques intérieures

Les recommandations climatiques généralement formulées pour la conservation des collections d'archives en fonction de leur nature matérielle ont été rappelées dans le chapitre 2. Les valeurs mentionnées représentent une sorte de consensus au sein de la communauté internationale mais, en aucun cas, des données normatives. Il appartient à

⁶¹ Depuis l'origine des civilisations, la question de l'adaptation des constructions aux contraintes climatiques a toujours été un formidable moteur pour l'innovation architecturale. Selon les cultures, les régions, les matériaux disponibles, les constructeurs, qu'ils aient été des professionnels ou des individus bâtissant pour leur usage propre, ont su développer des solutions d'une grande beauté esthétique et d'une efficacité parfois stupéfiantes (Voir les deux ouvrages de Bernard Rudofsky : *Architecture without Architects*, Doubleday, New York, 1964, ainsi que *The Prodigious Builders*, Harvest/HBJ Book, New York, 1971). Malheureusement, les facilités offertes par les technologies de traitement de l'air intérieur qui se sont développées à partir de la fin du XIX^e siècle ont conduit progressivement les bâtisseurs à délaisser puis oublier ce savoir-faire ancestral jugé peu « moderne ».

chaque conservateur de définir les objectifs climatiques qu'il considère comme les plus pertinents pour les fonds et collections dont il a la responsabilité, à la lumière bien entendu des avis que peuvent formuler les spécialistes qu'il voudra bien consulter : scientifiques spécialisés, restaurateurs, etc. Ses choix tiendront compte de l'état physique de ses collections, de leur histoire, de l'usage qui en est fait, éventuellement de leur valeur patrimoniale exceptionnelle. *In fine*, sur cette question du climat intérieur, c'est au conservateur, et à lui seul, que revient la responsabilité de fixer les termes du programme qui sera ensuite proposé aux professionnels de la construction. C'est un moment crucial du projet qui engage toute la suite des études. Si cette étape n'est pas correctement assurée, il y a de grandes chances pour que des difficultés surviennent ultérieurement.

Les principales cibles climatiques à atteindre sont listées dans le chapitre 5, au paragraphe « Les points clés à chaque étape du développement du projet ».

L'étude du climat extérieur

Dans le chapitre 3, il a été rappelé que **le principal moteur des perturbations thermohygrométriques ressenties à l'intérieur des bâtiments n'est autre que le climat extérieur**. Toutefois, chacun sait qu'il y a climat et climat⁶². L'impact du climat ne sera certainement pas le même pour un bâtiment selon qu'il est implanté dans une région à tendance continentale où prédominent en été des températures élevées associées à des humidités relatives modérées, ou bien dans une région de climat océanique caractérisée par des températures plutôt douces en même temps que des valeurs moyennes assez élevées de l'humidité relative.

Pratiquement, il conviendra de procéder à une analyse très approfondie de la climatologie locale pour évaluer les besoins effectifs de climatisation. Cette analyse devra

⁶² La classification de Köppen-Geiger, assez universellement reconnue, distingue cinq grandes familles de climats (tropical, sec, tempéré chaud, tempéré froid et polaire) repérées respectivement par les lettres A à E. Le régime pluviométrique et les variations de température servent à raffiner la classification. Ainsi, la France est classée « Cfb » ce qui correspond à la définition suivante : « Climat tempéré chaud, humide, sans saison sèche, avec des températures moyennes du mois le plus chaud inférieures à 22 °C ».

être conduite par le bureau d'études en charge du projet. Il pourra utiliser les données climatologiques qu'il possède ou bien se les procurer auprès des services de Météo-France. Lors d'un concours d'architecture, il peut être utile que le maître d'ouvrage transmette aux équipes d'ingénierie sélectionnées, un dossier climatique qu'elle aura établi. Cette initiative présente un double intérêt : d'une part, elle sensibilise les équipes à la question climatique mais aussi, elle permet aux compétiteurs de répondre aux concours avec les mêmes données. Dans un tel cas, les informations à réunir pourront être les suivantes :

- Dossiers comprenant les principales *normales climatiques*⁶³ pour la région concernée par le projet, avec notamment les moyennes mensuelles de la température, de l'humidité relative, des précipitations, de la vitesse du vent, de l'irradiation solaire, mais aussi la direction et la fréquence des vents dominants (rose des vents).
- Un fichier numérique comportant les valeurs horaires des paramètres cités plus haut auxquels s'ajouteraient la direction du vent et la pression atmosphérique.

Pour qui sait les utiliser, ces données constituent de précieuses informations pour comprendre la climatologie locale, clé fondamentale pour réussir un projet de construction. On ne construit pas *contre* le climat mais *avec* le climat comme l'avait déjà compris Vitruve⁶⁴ :

« Les Chambres et les Bibliothèques doivent être tournées au soleil levant, parce que leur usage demande la lumière du matin ; outre que les livres ne se gâtent pas tant dans ces Bibliothèques, que dans celles qui regardent le midi et le couchant, qui sont sujettes aux vers et à l'humidité ; parce que la même humidité des vents qui fait naître et qui nourrit les vers, fait aussi moisir les livres. »

Afin de faciliter l'approche des concepteurs en regard de la question « faut-il ou non climatiser ? », un critère de décision est proposé. Il est fondé sur le nombre de jours où la valeur moyenne quotidienne de la température extérieure dépasse le seuil haut de la plage de température souhaitée dans les magasins de conservation. Ceci mérite quelques explications. Un bâtiment d'archives correctement conçu présente une inertie thermique

⁶³ On nomme « normale climatique » une valeur de référence d'une grandeur météorologique en un lieu donné. La normale est calculée en faisant la moyenne de cette grandeur sur une période de 30 ans.

⁶⁴ Architecte romain du 1^{er} siècle av. J.-C. L'extrait cité est tiré de VITRUVÉ, *Les dix livres d'architecture*, traduits par C. Perrault, J.-B. Coignard, Paris, 1684, pp. 220, (réédition en fac-similé de P. Mardaga, 1979).

telle que la stabilité des températures intérieures y est presque parfaite. Autrement dit, les fluctuations de la température à l'échelle quotidienne sont pratiquement négligeables. Ceci n'est pas un rêve mais bel et bien une réalité attestée par les nombreuses campagnes de mesures réalisées sur des bâtiments existants non climatisés. Dans de tels bâtiments, en l'absence de sources internes de chaleur significatives, les températures observées sont très proches des valeurs moyennes journalières de la température extérieure. On peut donc aisément prédire quelles seront les évolutions à moyen terme de la température intérieure des magasins de conservation en connaissant les valeurs moyennes journalières de la température extérieure. Cette corrélation directe est extrêmement précieuse puisqu'elle permet de savoir, *a priori*, dans un climat donné, quelles seront les valeurs prévisibles de la température intérieure des magasins et, par conséquent, de décider si l'installation d'une climatisation est nécessaire ou non. La **Figure 18** matérialise cette approche. Elle représente l'histogramme des fréquences classées des valeurs moyennes quotidiennes de la température extérieure pour la ville de Strasbourg.

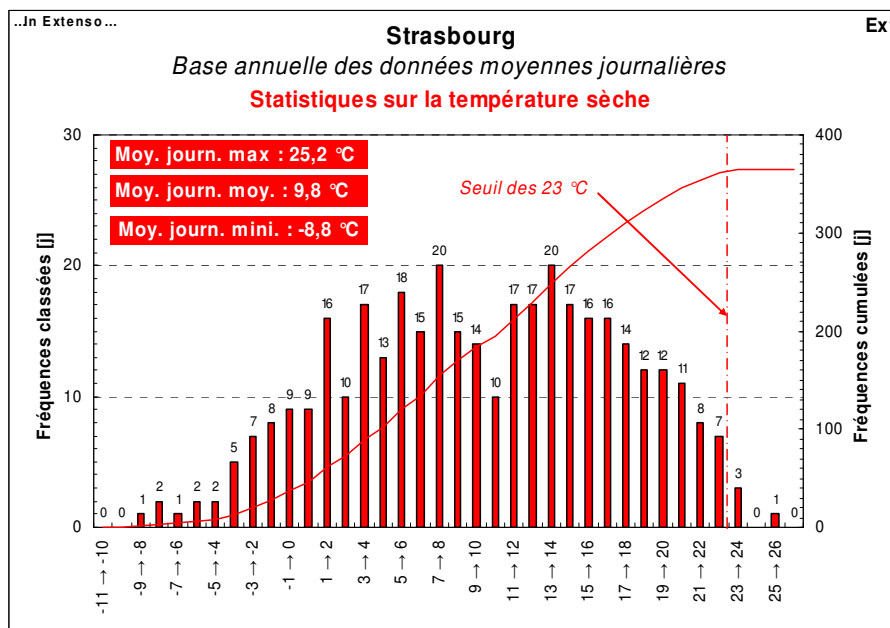


Figure 18 – Fréquences classées et fréquences cumulées de la température moyenne quotidienne pour Strasbourg exprimées en jours (source Météonorm).

Supposons que la limite haute de la température intérieure des magasins de conservation ait été fixée à 23 °C. Le graphe précédent permet de vérifier que ce seuil n'est dépassé à l'extérieur que pendant 4 jours. **Si l'inertie du bâtiment est suffisante, il est possible d'affirmer que la température intérieure dans les magasins ne dépassera**

23 °C que pendant 4 jours tout au plus, et sans doute moins si l'inertie thermique du bâtiment est particulièrement importante. Il restera à décider si le résultat obtenu est acceptable ou non. S'il l'est, il devient possible de renoncer à la climatisation. Si le nombre de jours de dépassement est jugé trop important, il conviendra soit de prévoir un équipement de climatisation, soit encore de modifier les caractéristiques du bâtiment pour le rendre plus inerte, le cas échéant.

Un raisonnement semblable peut être conduit avec l'humidité de l'air en utilisant le concept de rapport de mélange (\rightarrow LEXIQUE). Préalablement, examinons la **Figure 19**.

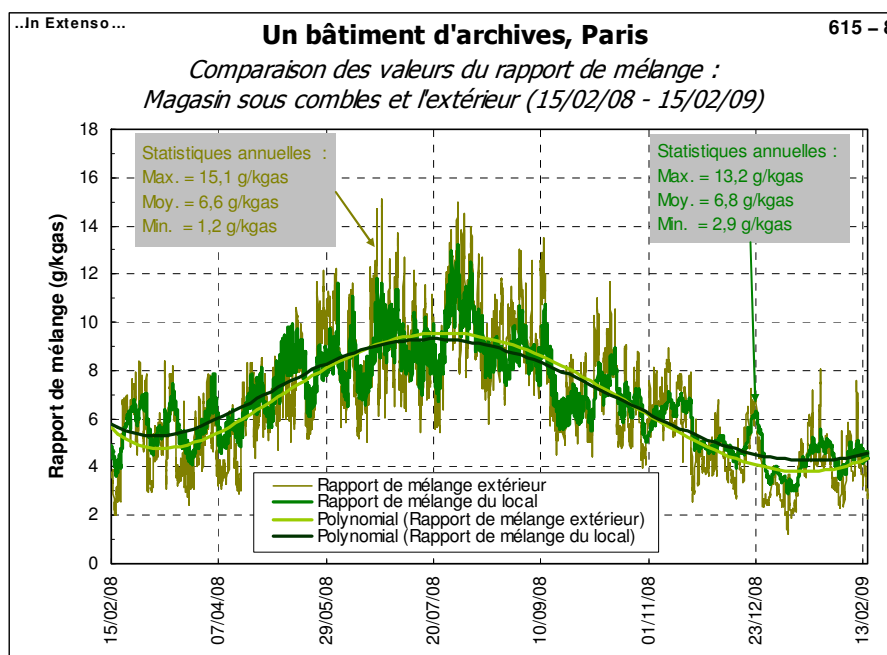


Figure 19 – Comparaison des valeurs du rapport de mélange entre l'intérieur et l'extérieur dans un magasin d'archives à Paris pendant une année.

Elle permet d'établir une comparaison entre le rapport de mélange calculé⁶⁵ pendant une année dans un magasin sous comble d'un bâtiment d'archives parisien non climatisé et moyennement ventilé, et ce même rapport de mélange déterminé pour l'air extérieur. Deux points importants doivent être soulignés. Le premier est le constat que l'amplitude à court terme des variations du rapport de mélange est plus faible à l'intérieur qu'à l'extérieur. Ce résultat n'est en rien surprenant si on prend en compte le rôle régulateur des archives sur le

⁶⁵ Rappelons que le rapport de mélange peut être calculé sans difficulté à partir des valeurs mesurées de la température sèche, de l'humidité relative et de la pression atmosphérique.

contenu en eau de l'air intérieur. La deuxième observation est particulièrement importante. On peut vérifier que les courbes polynomiales calculées à partir des données des rapports de mélange intérieur et extérieur afin de mettre en lumière leurs évolutions à long terme, sont pratiquement confondues. Ceci s'interprète d'une seule manière : **le contenu en eau de l'air intérieur est, en moyenne mensuelle et annuelle, pratiquement identique à celui de l'air extérieur**. Si, à un instant donné, des écarts importants peuvent apparaître, en plus ou en moins, à long terme, ces différences se compensent et les moyennes finissent peu ou prou par coïncider. Autrement dit, l'inertie hydrique des collections amortit les fluctuations hydriques de l'air mais, à la longue, ce sont bien les conditions de l'air extérieur qui provoquent les variations hydriques de l'air intérieur. Ce constat est fondamental en ce qu'il offre la possibilité, comme on a pu le voir avec la température, de choisir des conditions climatiques intérieures compatibles avec les variations extérieures et donc permettant de limiter, sinon supprimer, les besoins d'un traitement d'air sophistiqué. Des stratégies comme la réduction au minimum possible de l'introduction d'air neuf pendant les heures où le rapport de mélange extérieur est supérieur au rapport de mélange intérieur, voir son arrêt pur et simple, offre d'intéressantes alternatives aux systèmes de traitement d'air habituellement rencontrés.

Une telle démarche est fondée sur une connaissance détaillée du climat local. L'effort de recherche et d'analyse des données mérite donc d'être engagé car les gains potentiels en termes de simplification des installations peuvent être très importants⁶⁶. Mais elle suppose également une analyse tout aussi rigoureuse du bâtiment qu'il s'agit de réhabiliter ou de construire.

La définition architecturale du bâtiment d'archives

Deux situations doivent être distinguées. S'agit-il de la réhabilitation d'un bâtiment existant ou bien d'un projet de construction d'un nouvel équipement ?

⁶⁶ Ces gains portent à la fois sur les investissements initiaux mais aussi sur la diminution souvent spectaculaire des coûts d'exploitation et de maintenance.

Dans le cas d'une réhabilitation, l'approche est quelque peu simplifiée. En l'espèce, la seule démarche possible consiste à prévoir une période suffisamment longue⁶⁷ pendant laquelle une instrumentation sera mise en place afin d'identifier le comportement climatique de l'édifice. Par ailleurs, des relevés géométriques précis et une bonne compréhension de la nature des structures et des matériaux, fourniront à la maîtrise d'œuvre toutes les informations nécessaires à l'élaboration d'un projet de réhabilitation parfaitement adapté aux objectifs à atteindre et au bâtiment existant.

Si le problème posé est celui de la réalisation d'un nouveau bâtiment, la démarche à adopter, du point de vue climatique, est plus difficile. Toutes les options deviennent possibles et, par là même, les choix deviennent plus ardues. Force est d'admettre qu'un bâtiment, fût-il d'archives, ne peut pas être le résultat d'une simple exigence climatique. Bien d'autres critères doivent être définis, pesés et soupesés puis intégrés dans le projet. Ils appartiennent à des champs professionnels très divers : l'urbanisme, l'architecture, l'ergonomie, la conservation, l'économie, etc., et exigent par conséquent l'intervention de nombreux spécialistes. Chacun sera tenté de proposer pour son domaine d'activité une solution qu'il jugera optimale. L'expérience démontre cependant qu'un bâtiment globalement optimisé ne résulte pas de la simple addition de solutions optimales limitées à une discipline. Il appartient le plus souvent à l'architecte d'arbitrer entre plusieurs options techniques qui peuvent être incompatibles. De ce point de vue, il n'est pas exagéré de dire que *construire* est devenu synonyme de *choisir*.

Toutefois, la fonctionnalité d'un bâtiment d'archives étant la conservation des fonds et collections, il n'est pas surprenant que les questions du climat occupent une place centrale dans le processus d'élaboration des projets. Aussi n'est-il pas illégitime d'aborder les divers aspects de la conception des bâtiments du point de vue de la climatologie appliquée. Un tel sujet mériterait à lui seul un véritable traité de construction. Compte tenu des limites de cet ouvrage, seuls quelques thèmes seront évoqués.

⁶⁷ Idéalement, une campagne de mesures devrait durer une année afin de suivre le comportement du bâtiment pendant quatre saisons. Il n'est pas toujours possible d'attendre un an pour répondre aux questions qui se posent. Il convient alors d'analyser très finement les données enregistrées à l'aide de modèles mathématiques adaptés qui permettront, sur la base d'une campagne réduite dans le temps, d'extrapoler les résultats obtenus sur une année type.

Une des premiers sera la typologie architecturale que le maître d'œuvre souhaitera retenir. Du point de vue de l'insertion de l'édifice à construire sur le terrain, on pourra définir trois options : bâtiment enterré, semi-enterré, aérien. Notons que le comportement dynamique des constructions s'en trouve, à l'évidence, très fondamentalement déterminé. Le bâtiment enfoui sera, toutes choses égales par ailleurs, plus inerte que celui édifié plus classiquement au dessus du niveau du terrain naturel.

Autre thème, le choix de la structure et des matériaux de remplissage. Ils vont jouer un rôle fondamental. Comme cela a été déjà indiqué dans le chapitre précédent, un édifice construit avec une structure métallique et des panneaux isolants consommera peu mais présentera un déficit d'inertie thermique qui rendra sa régulation très difficile. À l'inverse, si la maîtrise d'œuvre choisit un procédé constructif lourd en béton armé avec des panneaux pleins en maçonnerie, l'inertie sera en général suffisante pour garantir une excellente stabilité thermique journalière.

Il faut également évoquer la question de la forme d'un bâtiment dont l'impact sur le climat intérieur ne peut être négligé. Elle peut être examinée à travers la notion de compacité. D'un point de vue purement mathématique, la sphère est la forme la plus compacte qui puisse être imaginée puisqu'elle présente le ratio surface extérieure sur volume le plus faible possible. Vient ensuite le cube, solution architecturale plus réaliste pour construire un bâtiment d'archives mais dont la compacité, à volume identique à celui de la sphère, est moins bonne⁶⁸. À son tour, un bâtiment affectant la forme d'un parallépipède rectangulaire aura une compacité moins bonne que celle d'un cube.

Comme cela a été montré dans le paragraphe « Influence des facteurs architecturaux sur le climat intérieur » (page 47), cette compacité dégradée aura des conséquences à la fois sur la stabilité intérieure du climat mais aussi sur le coût de construction et d'exploitation du bâtiment. En effet, pour un volume donné, plus la surface extérieure est grande et plus il

⁶⁸ Calculée comme le ratio d'une surface sur un volume, la compacité est une grandeur dont la dimension est donc l'inverse d'une longueur. Plus le chiffre est grand, moins bonne est la compacité. La compacité d'une sphère de rayon r est égale à $3/r$. Celle d'un cube de côté a est $6/a$. On peut montrer que le ratio des compacités respectives d'un cube et d'une sphère de même volume est indépendant de a et de r et égal à la valeur constante de $\sqrt[3]{6/\pi}$ soit environ 1,24. Autrement dit, à volume identique un cube présente une surface extérieure plus grande de 24 % que celle de la sphère.

faut de matériaux pour construire le bâtiment, plus il faut accroître la puissance énergétique des équipements de chauffage et de rafraîchissement, plus la consommation annuelle d'énergie sera importante.

Enfin, dernier critère architectural, les choix de distribution et de morphologie internes vont sensiblement influencer sur les performances climatiques des magasins de conservation. Selon qu'ils seront placés au cœur du bâtiment ou en périphérie, les espaces de conservation ne bénéficieront pas de la même stabilité. Les solutions minimisant le contact direct des magasins avec l'extérieur devront donc être privilégiées.

L'optimisation architecturale ayant été conduite, la question d'origine resurgit : faut-il climatiser ? Répétons qu'il est pratiquement impossible de répondre de manière normative à cette question. Il a été indiqué qu'une démarche plus rationnelle consiste à définir les objectifs climatiques à atteindre dans les magasins de conservation, puis à évaluer l'ampleur des perturbations climatiques locales qui s'exerceront sur le ou les bâtiments, puis, enfin, à s'interroger sur le type de bâtiment qu'il convient de réaliser (ou transformer) pour minimiser, sinon supprimer, les besoins de climatisation.

La logique autant que la sagesse commande de réduire les besoins de corrections climatiques plutôt que d'y répondre sans les mettre en question. Quand un réservoir fuit, il vaut mieux rechercher son défaut d'étanchéité plutôt que de tenter de le remplir. Réduire les besoins de climatisation d'un bâtiment par une intervention réfléchie sur son enveloppe, c'est aussi garantir qu'en cas de défaillance possible d'un éventuel équipement, la dérive climatique sera plus faible et donc moins dangereuse pour les collections.

Choix technologiques

Même si les qualités constructives intrinsèques d'un bâtiment sont bonnes, il peut cependant être nécessaire de prévoir des équipements climatiques intérieurs, notamment si les exigences de conservation sont sévères : plages restreintes des températures et des humidités relatives, faibles tolérances des fluctuations quotidiennes, etc. C'est la raison pour laquelle des technologies correctives ont été imaginées. Les paragraphes suivants en proposent un rapide survol en insistant davantage sur les principes sous-jacents que sur les dispositions technologiques proprement dites dont le détail est inutile ici.

Chauffage seul

Chauffer l'air d'un local consiste à lui transférer une certaine quantité d'énergie afin d'augmenter sa température ou simplement la maintenir à une certaine valeur de consigne. Ceci est parfaitement clair et connu de tous. Il est cependant une conséquence de cette opération qui est moins évidente. Injecter de l'énergie dans l'air, et seulement de l'énergie, va augmenter sa température mais va également diminuer son humidité relative (→ LEXIQUE). Si la température augmente, la pression de vapeur saturante, qui est une fonction croissante de la température, augmente également. Comme la simple opération de chauffage ne modifie pas le contenu en vapeur d'eau de l'air, que l'on désigne par l'expression « rapport de mélange », il s'en suit que l'humidité relative est abaissée. Ce phénomène est illustré par la **Figure 20**.

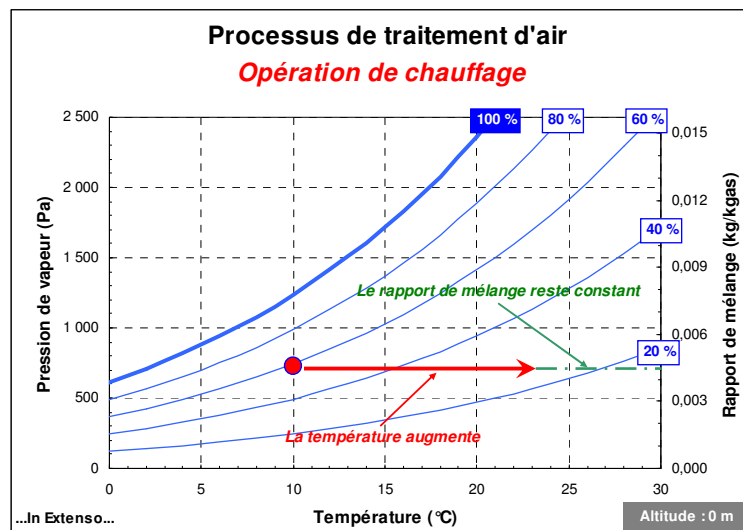


Figure 20 – Représentation d'un processus de chauffage sur un diagramme psychrométrique.

Sur l'illustration, l'air est initialement à 10 °C et 60 % d'humidité relative. Si on se contente de le chauffer jusqu'à une température de 27 °C, par exemple, son humidité relative va tomber à 20 %. Ainsi, en période hivernale, il n'est pas rare de voir des magasins de conservation dans lesquels un système de chauffage a été installé, présenter des valeurs de l'humidité très basses, trop basses... On connaît les dangers du maintien d'une humidité relative en deçà de 40 % : les papiers et les colles deviennent cassants, les cuirs se craquellent... Un remède simple à ce problème consiste à réduire l'émission de chaleur dans les locaux et donc à en diminuer la température. La quantité de vapeur d'eau dans l'air ne changera pas mais, la température diminuant, l'humidité relative retrouvera des niveaux

plus acceptables pour les fonds et collections. Il s'agit d'une solution efficace et économique certes, mais, malheureusement, elle n'est pas toujours bien acceptée compte tenu de l'inconfort thermique qu'elle peut induire pour le personnel. Pour faciliter son adoption, on peut retenir une option technique moins radicale. Peu courante bien que très facile à mettre en œuvre, l'idée consiste à assurer la régulation du chauffage des magasins non pas en fonction de la température, ce qui est la solution habituelle, mais en fonction de l'humidité relative en faisant en sorte que le chauffage soit réduit quand l'humidité relative tend à tomber en dessous de 40 %. On fait donc appel à un hygrostat plutôt qu'à un thermostat. Ainsi, on préserve les collections de valeurs trop basses de l'humidité relative tout en maintenant, le plus longtemps possible, une température plus agréable dans les magasins. Quoi qu'il en soit, cette régulation devra respecter les amplitudes maximales de variation de la température et de l'humidité relative fixées par les responsables des magasins de conservation.

Chauffage hivernal et rafraîchissement estival

Le rafraîchissement est à la période estivale ce que le chauffage est la période hivernale⁶⁹. L'objectif est de réduire la température des locaux à des valeurs « acceptables » lorsque la température extérieure atteint des niveaux pouvant être caniculaires.

Si une augmentation de la température, à rapport de mélange constant, provoque corrélativement une baisse de l'humidité relative de l'air, la réduction de la température de l'air provoque son augmentation. Si le refroidissement de l'air est poursuivi, l'humidité relative continue d'augmenter jusqu'à atteindre la valeur limite de 100 % correspondant à la saturation de l'air. On atteint alors un point caractéristique de l'air du local nommé *température de rosée* (→ LEXIQUE). Pour un simple rafraîchissement, on prend garde de refroidir l'air en restant en deçà de ce point.

⁶⁹ Il n'y a pas de parfaite symétrie des périodes de chauffage et des périodes de rafraîchissement, ni en durée, ni en amplitude. Pour évoquer la seule région parisienne dotée d'un climat très « moyen », on observera que la saison de chauffage s'étend du mois d'octobre au mois de mai alors que la saison au cours de laquelle un rafraîchissement pourrait être jugé nécessaire, ne dépasse pas quelques semaines, sinon quelques jours, pendant les mois d'été. Les écarts maximaux entre la température intérieure et extérieure est de l'ordre de 30 °C l'hiver contre seulement 10 °C l'été.

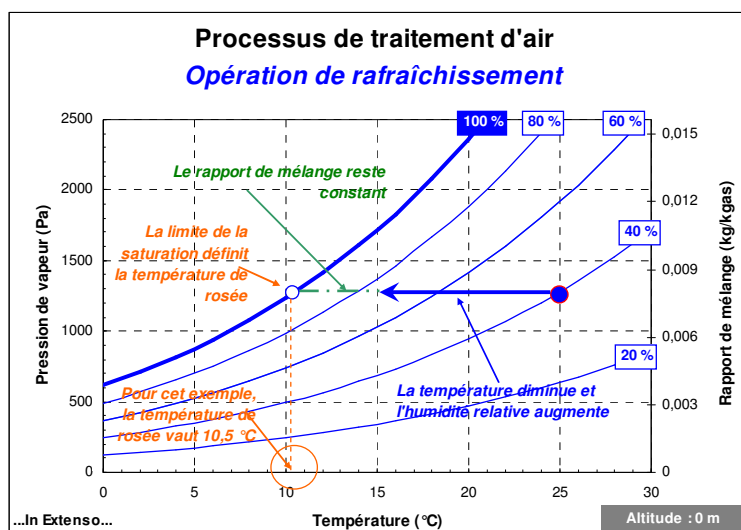


Figure 21 – Représentation d'un processus de rafraîchissement sur un diagramme psychrométrique.

Il est bien entendu possible de poursuivre le refroidissement de l'air au-delà du point de saturation, mais alors une condensation de la vapeur d'eau en excès dans l'air, se produit. Sur l'illustration précédente, partant d'un air à 25 °C et 40 % d'humidité relative, on atteint la limite de la saturation, et donc le début de la condensation, lorsque la température de l'air est ramenée à 10,5 °C. Ce processus peut être délibérément mis en œuvre chaque fois que l'on souhaite déshumidifier l'air. On comprend pourquoi la déshumidification est coûteuse du point de vue énergétique. Il faut tout d'abord refroidir l'air pour extraire l'humidité en excès puis ensuite le réchauffer pour pouvoir le souffler dans les locaux à une température adaptée. Du simple rafraîchissement, on passe alors à la climatisation.

Climatisation

A minima, l'objectif de la climatisation⁷⁰ est de contrôler, à tout instant, la température et l'humidité relative de l'air d'un local afin d'y maintenir des conditions climatiques prédéfinies par l'utilisateur en accord avec la destination du lieu. Pratiquement, une autre fonction est assurée en parallèle : le maintien d'une qualité d'air correcte pour les occupants du bâtiment concerné mais aussi, dans le cas des espaces patrimoniaux, pour les collections qui y sont abritées. La réalisation d'un tel programme va nécessiter la mise en œuvre d'un

⁷⁰ Conditionnement d'air ? Climatisation ? Certains auteurs distinguent de subtiles nuances entre les termes. Pour simplifier, ces expressions seront considérées comme synonymes dans cet ouvrage.

ensemble de technologies relativement complexes et coûteuses tant à l'installation que pendant la phase d'exploitation.

Le schéma suivant décrit les différentes opérations qu'un équipement de climatisation doit pouvoir réaliser en fonction des besoins des espaces contrôlés.

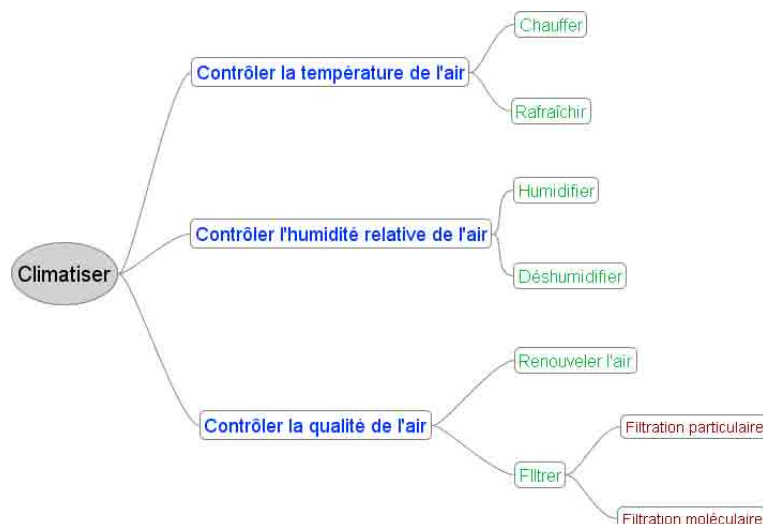


Figure 22 – Hiérarchie fonctionnelle d'un système de climatisation.

Cet ouvrage n'est pas un traité de climatisation⁷¹. Inutile par conséquent d'y chercher une description exhaustive de tous les systèmes existants. Un simple énoncé de quelques principes typologiques devrait suffire pour aider le lecteur à s'y retrouver.

Première clé de classement : le fluide principal utilisé. Contrôler la température d'un local nécessite de lui apporter de l'énergie⁷². Ceci est réalisé grâce à un fluide caloporteur qui peut être de l'air ou de l'eau. Selon l'option retenue, on parle de *systèmes à air* ou de *systèmes à eau*. L'eau ayant une capacité thermique massique environ quatre fois plus élevée

⁷¹ Pour ceux qui souhaiteraient disposer de références très complètes sur ces questions très techniques, on peut suggérer deux ouvrages collectifs en langue française : H. RECKNAGEL et *al.* – *Manuel pratique du génie climatique*, 3 tomes (2 730 p.), Pyc Livres, Paris, 1995-2002 ; J. BOUTELOUP, M. LE GUAY, J. LIGEN. – *Climatisation et conditionnement d'air*, 6 tomes (1 380 p.), Les Éditions parisiennes, Paris, 2009.

⁷² Par commodité, on parlera d'énergie *calorifique* si le local a besoin d'être chauffé, et d'énergie *frigorigène* s'il a besoin d'être rafraîchi. Ces dénominations sont parfaitement conventionnelles. Dans la pratique, il suffit de jouer sur la température du fluide caloporteur : elle sera plus faible que la température du local lorsqu'on voudra le rafraîchir, plus élevée quand on voudra le chauffer.

que l'air et une masse volumique environ huit cents fois plus grande⁷³, il apparaît donc comme un vecteur parfaitement adapté pour le transfert d'énergie. Toutefois, lorsqu'il est nécessaire de contrôler précisément non seulement la température mais aussi l'humidité relative de l'air d'un local, les systèmes à eau doivent être doublés d'un système complémentaire (humidificateur et/ou déshumidificateur locaux ou associés à un système à air), ce qui réduit leurs atouts initiaux. Dans les faits, on observe que là où le contrôle hygrométrique des locaux est crucial, les systèmes utilisés sont presque toujours des systèmes à air. Ce qui ne veut pas dire que l'eau n'est pas utilisée. En effet, dans les systèmes à air, l'air caloporteur doit être chauffé ou refroidi, humidifié ou déshumidifié. Ceci nécessite des dispositifs spécifiques tels que des humidificateurs, des batteries de chauffage ou de rafraîchissement, qui sont, la plupart du temps, alimentés en eau.

Si les systèmes à air présentent des inconvénients dus essentiellement à la médiocrité de l'air en tant que fluide caloporteur, ce qui a pour principales conséquences de nécessiter des gaines encombrantes et d'induire des consommations électriques importantes dues aux ventilateurs, ils sont cependant « incontournables » dans les magasins d'archives climatisés. Eux seuls permettent de garantir qu'aucune canalisation d'eau ne passe dans ces locaux sensibles. En effet, l'air peut être préparé – c'est-à-dire chauffé, humidifié, etc. – en dehors des magasins dans des « centrales de traitement d'air⁷⁴ » installées dans des locaux techniques spécialisés, voire à l'extérieur du bâtiment.

Une deuxième façon de classer typologiquement les systèmes de climatisation consiste à mesurer leur complexité, depuis les plus simples assurant le traitement d'un seul local (on parle alors de « systèmes autonomes » s'ils assurent simultanément la production de froid ou de chaud et sa diffusion dans le local⁷⁵), jusqu'aux plus développés capables de

⁷³ Les expressions « capacité thermique massique », « capacité calorifique » et « chaleur massique » sont synonymes. À pression normale et au voisinage de 0 °C, la capacité thermique massique de l'eau liquide est voisine de 4 185 J/kg.°C contre seulement environ 1 005 J/kg.°C pour l'air. Ces grandeurs présentent une légère dépendance en fonction de la température. Dans les mêmes conditions, la masse volumique de l'eau est très proche de 1 000 kg/m³ tandis que celle de l'air sec est d'environ 1,3 kg/m³.

⁷⁴ L'expression « centrale de traitement d'air » s'abrège en CTA.

⁷⁵ Les appareils fixes utilisés dans les maisons individuelles ou dans les petits magasins sont très souvent de ce type. Ils sont souvent désignés par l'expression anglo-saxonne *split-system*. Cette appellation indique que l'évaporateur placé dans le local à rafraîchir est séparé du condenseur chargé d'évacuer la chaleur qui lui, est

climatiser l'ensemble d'un bâtiment (il s'agit alors de « systèmes centralisés »). Comme les bâtiments ne sont jamais strictement semblables quand bien même ils assurent des fonctions analogues comme celle de conserver des archives, il n'est pas surprenant que les systèmes de climatisation qui les équipent éventuellement ne soient pas davantage identiques. Même si les principes physiques sous-jacents sont les mêmes, les équipements de climatisation peuvent varier sensiblement d'un bâtiment à l'autre pour des raisons architecturales, constructives, techniques et, bien sûr, économiques.

Les questions économiques sont précisément l'un des facteurs qu'on ne saurait oublier. Les systèmes de climatisation ne sont pas seulement coûteux à concevoir et à installer, ils représentent, leur vie durant, une charge financière importante pour la collectivité gestionnaire qui doit assurer leur fonctionnement et leur entretien. Ceci explique que les responsables de collections soient parfois tentés de faire appel à des appareils mobiles jugés moins coûteux et d'emploi plus aisé pour corriger ponctuellement le climat des espaces de conservation. Cette option est-elle envisageable à long terme ?

Que faut-il penser des appareils mobiles pour l'humidification et la déshumidification ?

Dans de nombreux établissements patrimoniaux dépourvus d'installations de climatisation, il n'est pas rare de trouver des appareils autonomes, faciles à déplacer, destinés à humidifier ou, à l'inverse, à déshumidifier certains locaux. La raison principale invoquée par la plupart des utilisateurs pour justifier leur usage, tient en la simplicité de la solution et, partant, dans son faible coût. Les partisans de ces appareils arguent du fait que les besoins d'humidification ou de déshumidification sont restreints dans le temps et, parfois, limités à un ou deux espaces. Cette option éviterait donc d'investir dans des installations sophistiquées et onéreuses.

Ces arguments sont-ils recevables ? Avant de répondre à cette question, il convient de rappeler rapidement le mode de fonctionnement de ces appareils.

○ Les humidificateurs autonomes

placé à l'extérieur. Entre les deux composants, une liaison frigorifique constituée de deux canalisations qu'il convient impérativement d'isoler, doit être établie.

Il existe plusieurs techniques d'humidification : pulvérisation d'eau liquide, injection de vapeur, évaporation. La première induit des risques sanitaires. Il convient donc de l'éliminer. L'injection de vapeur dans l'air est en général réservée aux dispositifs fixes. La plupart des appareils mobiles font donc appel à l'évaporation. À l'aide d'un ventilateur, l'air du local, jugé trop sec, est soufflé à travers un média dont on maintient l'humidité à un niveau élevé par ruissellement ou par rotation du média dans une cuve d'eau. Au contact du média humide, l'air sec provoque une évaporation de l'eau. Il se charge en vapeur d'eau et voit donc son hygrométrie s'accroître. Il est alors rejeté dans le local. Un hygrostat permet normalement d'assurer une régulation du processus d'humidification.

La figure suivante permet de suivre l'évolution de l'air sur un diagramme psychrométrique.

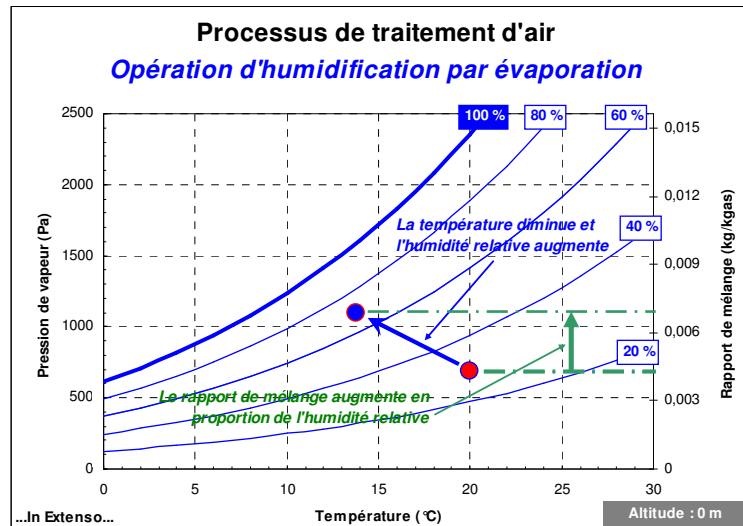


Figure 23 – Représentation d'un processus d'humidification par évaporation sur un diagramme psychrométrique.

On observe qu'en s'humidifiant, l'air se refroidit. Dans l'exemple, il gagne $2,5 \text{ g}_v/\text{kg}_{\text{as}}$ mais, dans le même temps, perd $6 \text{ }^\circ\text{C}$. L'évaporation est un processus endothermique⁷⁶. L'énergie nécessaire à l'évaporation est prélevée sur l'air ce qui provoque une baisse de sa température⁷⁷. Un processus d'humidification par évaporation entraîne donc une charge

⁷⁶ Processus qui absorbe de l'énergie. Par opposition à *exothermique*, qui restitue de l'énergie. L'évaporation est endothermique, la condensation est exothermique.

⁷⁷ Un tel processus qui s'établit à énergie totale constante est dit *adiabatique*.

thermique dans le local où s'effectue l'opération, charge qu'il faut compenser par un apport d'énergie.

Le contrôle de l'hygrométrie d'un espace n'est donc pas gratuit. Ce n'est pas le seul inconvénient à déplorer. Voici une liste d'observations tirées de l'expérience et qu'il faudra, en fonction de besoins ou préoccupations propres à une situation particulière, considérer comme de simples inconvénients ou des défauts rédhibitoires :

- Le plus souvent, la régulation de l'hygrométrie par les humidificateurs autonomes n'est pas très précise. Il faut donc accepter des fluctuations qui peuvent être rapides et importantes en amplitudes.
- Les humidificateurs comportent un ventilateur. Il s'agit donc d'un équipement générateur de bruit.
- Un humidificateur autonome impose une maintenance qui dépasse le simple contrôle du niveau de l'eau dans la cuve. Une hygiène parfaite de l'appareil devra être assurée pour éviter tout risque de développement de micro-organismes. Ceci impose notamment une vidange et une désinfection régulière du circuit d'eau.
- ***Les déshumidificateurs autonomes***

Pour assurer leur fonction de déshumidification, la plupart des appareils autonomes disponibles sur le marché disposent d'un circuit frigorifique associé à un ventilateur chargé de faire circuler l'air dans l'appareil. L'air aspiré par le ventilateur passe d'abord sur ce qu'il est convenu d'appeler l'*évaporateur* du circuit frigorifique, ainsi nommé parce que le fluide frigorigène contenu dans le circuit s'y évapore à basse pression. Cette évaporation du fluide prélève de la chaleur à l'air en le refroidissant au-delà de sa température de rosée (→ LEXIQUE). Ceci provoque une condensation de la vapeur d'eau. L'air ainsi refroidi et déshumidifié est ensuite réchauffé en traversant le *condenseur* du circuit frigorifique qui lui restitue alors la chaleur initialement prélevée et, accessoirement, la chaleur produite par la compression du fluide frigorigène. Ce cycle complexe est illustré par le schéma suivant sur lequel des différentes étapes que viennent d'être décrites sont dessinées et commentées.

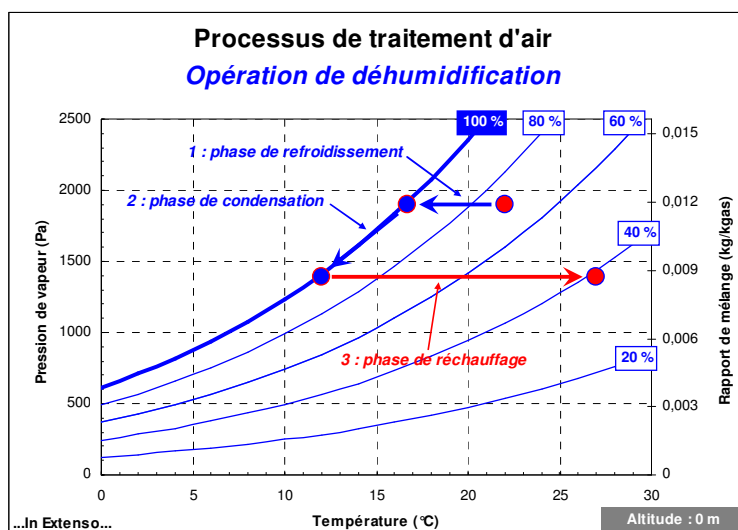


Figure 24 – Représentation d'un processus de déshumidification sur un diagramme psychrométrique.

L'utilisation de déshumidificateurs mobiles expose aux mêmes difficultés et inconvénients que ceux qui ont été énoncés pour les humidificateurs. Ils ne seront donc pas répétés.

Il est impossible d'affirmer de manière péremptoire que les appareils mobiles ne servent à rien, qu'ils sont dangereux et qu'il convient par conséquent, de les rejeter sans appel, au nom de la conservation du patrimoine. À l'inverse, il est sans doute permis de dire que les humidificateurs ou déshumidificateurs peuvent, ponctuellement, aider à résoudre un problème passager. Il paraît difficile cependant de les recommander pour un usage courant et permanent comme cela peut être vu ici ou là. Il est plus raisonnable de les considérer comme des matériels de dépannage auxquels on fait appel quand les dispositifs principaux de contrôle du climat sont défectueux ou, de manière transitoire, insuffisants. On ne saurait construire un plan responsable du contrôle climatique de locaux de conservation sur l'utilisation systématique d'appareils conçus pour un usage occasionnel.

La question du renouvellement d'air

Cela a été précédemment, des raisons évidentes de prévention militent pour n'utiliser que des systèmes à air dans les magasins de conservation d'archives. Comme il en sera beaucoup question dans les paragraphes qui suivent, autant s'entendre immédiatement sur quelques points de vocabulaire. La figure suivante représente le schéma de principe très

simplifié du traitement d'air d'un local. Il va permettre de donner un nom conventionnel aux différents flux d'air qui circulent dans l'installation ainsi qu'à quelques organes nécessaires au fonctionnement de l'ensemble.

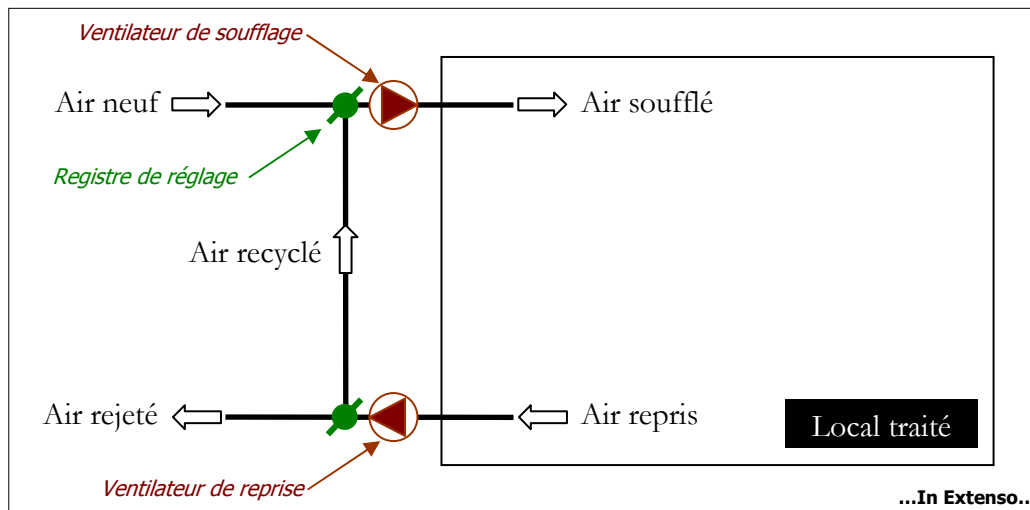


Figure 25 – Schéma de principe du traitement d'air d'un local.

Parmi les recommandations relatives aux caractéristiques des systèmes de contrôle du climat dans les magasins d'archives figurant dans la littérature spécialisée, l'une des plus fréquentes est sans doute celle qui concerne le *taux de brassage de l'air*, notion qu'il convient d'emblée, de ne pas confondre avec celle du *taux de renouvellement d'air*. Comme son nom l'indique, le taux de renouvellement d'air se définit comme le débit d'air neuf introduit dans un local rapporté au volume dudit local. Ce taux est souvent exprimé en volume par heure⁷⁸. Le taux de brassage de l'air n'a pas de relation directe avec le taux de renouvellement d'air. Il peut se définir comme le ratio du débit d'air soufflé dans le local au volume de ce dernier. Il résultera donc du mode de diffusion de l'air dans un espace donné et non de la quantité d'air extérieur introduit dans ledit espace.

Une question préalable s'impose. Faut-il renouveler l'air des magasins ? Ceux qui sont tentés de répondre « oui, bien sûr » en invoquant la nécessité pour les collections de « respirer » vont être déçus. Les archives ne « respirent » pas, pas plus que les murs ou les maisons au demeurant. Elles échangent de la vapeur d'eau avec l'ambiance, elles libèrent

⁷⁸ Pour simplifier, cette pseudo-unité sera notée « vol/h » Lorsqu'on écrira « tel taux vaut 0,5 vol/h », il faudra lire « tel taux correspond à un débit égal la moitié du volume du local concerné chaque heure ».

éventuellement des composés organiques volatils. C'est à peu près tout. Du point de vue des êtres vivants, l'oxygène est une substance indispensable. En revanche, pour une collection d'archives, il peut être considéré comme un polluant ! Non seulement le papier ne « respire » pas, mais l'oxygène de l'air contribue indéniablement à sa destruction. Dans l'idéal, il conviendrait de conserver les collections dans une atmosphère chimiquement neutre de telle sorte que le papier et les matériaux constitutifs des archives demeurent en complète anoxie.

Si l'oxygène est nuisible pour les collections, pour quelles raisons doit-on cependant renouveler l'air les archives ? Deux raisons peuvent être invoquées. Commençons par la plus importante : pour des raisons évidentes de santé individuelle évoquées plus haut, le personnel doit pouvoir respirer un air sain contenant une quantité suffisante d'oxygène. Le Code du travail précise :

« **Art. R. 232-5** – Dans les locaux fermés où le personnel est appelé à séjourner, l'air doit être renouvelé de façon à :

- Maintenir un état de pureté de l'atmosphère propre à préserver la santé des travailleurs ;
- Éviter les élévations exagérées de température, les odeurs désagréables et les condensations. »

Dans le texte du Code du travail transparait la deuxième raison pour laquelle l'air doit être renouvelé. Si les organismes vivants puisent dans leur environnement l'oxygène nécessaire à leur métabolisme, ils y rejettent vapeur d'eau, dioxyde de carbone et autres polluants chimiques⁷⁹. Outre l'apport d'oxygène pour le personnel, le renouvellement d'air dans un local d'archives a donc pour fonction complémentaire d'évacuer⁸⁰ les polluants

⁷⁹ C'est là la conséquence de la deuxième phase de la respiration. La première phase, l'*inspiration*, introduit l'air dans les organes respiratoires tandis que la seconde phase, l'*expiration* permet le rejet des sous-produits de la respiration dont du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau.

⁸⁰ Les locaux n'ont pas de parois élastiques. Par conséquent, la quantité d'air soufflée à l'intérieur doit nécessairement être compensée par une quantité d'air sortant strictement identique. Si le débit massique d'air extrait du local est plus faible que le débit massique d'air soufflé, il en résultera une légère surpression dans le local. L'excédent d'air soufflé sortira par les zones comportant des défauts d'étanchéité (joints de porte le plus souvent) de telle sorte que l'équation fondamentale « débit massique entrant = débit massique sortant » soit rigoureusement respectée. La question de la surpression des locaux sera traitée plus loin.

émis dans l'ambiance par les occupants, mais aussi par les matériaux de construction et, éventuellement, les collections elles-mêmes. On a pu observer des situations de pollution chimique intérieure due notamment à l'émission de composés organiques volatils par les boîtes dans lesquelles les archives étaient rangées⁸¹. Les collections photographiques contenant des supports nitrates ou acétates de cellulose⁸² représentent un risque particulièrement important requérant des dispositions techniques spéciales. En la circonstance, les moyens à mettre en œuvre peuvent être très complexes et leur description sortirait du cadre de cet ouvrage⁸³.

Quel taux d'air neuf faut-il prévoir ?

Même si les magasins de conservation ne sont pas des lieux d'occupation permanente, il convient de prévoir un renouvellement d'air tel que les exigences formulées par le Code du travail soient satisfaites. Dans des locaux à pollution non spécifique⁸⁴ comme des bureaux, le législateur a fixé à 25 m³/h le débit minimal d'air neuf à prévoir par occupant. De son côté, la norme NF EN 13779⁸⁵, considère que le débit de 25 m³/h correspond à une qualité d'air « standard ». Elle propose une valeur de 36 m³/h pour une qualité d'air « excellente ». Retenons cette dernière valeur et faisons l'hypothèse d'un magasin de conservation d'une surface de 200 m², d'un volume de 500 m³ recevant en permanence (8 heures par jour, 365 jours par an) un magasinier. On conviendra qu'il s'agit là d'une hypothèse très pénalisante (Voir le paragraphe « Influence des facteurs

⁸¹ Le cas le mieux documenté est celui des magasins la Bibliothèque nationale de France. Voir à ce sujet : T. NGUYEN, M. DUBUS, S. MAREYNAT. – « Corrosivité de l'air dans les magasins de stockage du site François-Mitterrand de la BnF », *Actualités de la conservation*, n° 25, janvier-décembre 2006, pp. 6-9.

⁸² La lente décomposition de ces supports produit des gaz toxiques dangereux pour le personnel mais aussi pour les collections elles-mêmes.

⁸³ Ce cas de figure correspondrait à ce que le Code du travail appelle des locaux à pollution spécifique qu'il définit ainsi : « locaux dans lesquels des substances dangereuses ou gênantes sont émises sous forme de gaz, vapeurs, aérosols solides ou liquides autres que celles qui sont liées à la seule présence humaine, locaux pouvant contenir des sources de micro-organismes potentiellement pathogènes et locaux sanitaires ».

⁸⁴ Le Code du travail définit ainsi un local à pollution non spécifique : « locaux dans lesquels la pollution est liée à la seule présence humaine, à l'exception des locaux sanitaires ».

⁸⁵ NF EN 13779, « Ventilation dans les bâtiments non résidentiels - Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air », juillet 2007.

d'occupation et des équipements techniques », page 64). Pour demeurer en conformité parfaite avec la législation et la normalisation, la quantité d'air neuf à apporter quotidiennement dans le magasin serait donc de 288 m³. Ceci correspond à un débit moyen d'air neuf à introduire dans le magasin de 12 m³/h, ou encore à un taux de renouvellement d'air égal à 0,024 volume par heure seulement, valeur fort éloignée des taux qui étaient naguère recommandés.

Dans la dernière version de ses « Règles de base pour la construction et l'aménagement d'un bâtiment d'archives », la direction des Archives de France rappelle que la recommandation antérieure d'une valeur de 0,50 volume par heure pour le renouvellement d'air des magasins de conservation pouvait être largement revue à la baisse et suggère désormais le taux de 0,10 volume par heure [DAF, 2009].

Avant de proposer quelques valeurs raisonnables du taux de renouvellement d'air dans les magasins de conservation, il faut comprendre quelles sont les conséquences d'un taux de renouvellement d'air excessif.

L'excès d'apport d'air neuf présente deux inconvénients majeurs :

- Il contribue à détruire la capacité d'auto-équilibrage de l'humidité relative par les collections elles-mêmes, phénomène qui a été décrit précédemment ; en effet, sauf à traiter l'air neuf de telle sorte que sa température et son humidité relative soient exactement aux conditions observées dans les magasins, toute injection d'air neuf constituera une charge thermique et une charge hydrique pour les locaux susceptibles de déstabiliser les collections.
- Chaque mètre cube d'air introduit dans les magasins devra être traité en température et en hygrométrie, soit à la source, soit dans les locaux mêmes. Dans tous les cas, la consommation énergétique sera proportionnelle au débit d'air introduit. Elle comprendra les coûts du traitement d'air proprement dit mais aussi le coût du transport de l'air depuis l'extérieur jusqu'au magasin⁸⁶.

Un choix raisonné du taux effectif d'air neuf à introduire dans les magasins de conservation doit être déterminé sur les bases précédentes, sans craindre que le taux effectif

⁸⁶ La consommation électrique d'un ventilateur est proportionnelle à son débit et à la perte de charge que subit l'air transporté qui dépend, pour sa part, de la nature et de la géométrie du réseau de gaines.

d'apport d'air neuf tombe largement en dessous de 0,10 vol/heure⁸⁷. Si le bureau d'études souhaite disposer d'une marge de sécurité, il pourra choisir d'équiper la centrale d'air neuf d'un ventilateur à débit réglable permettant d'augmenter temporairement le débit d'air neuf introduit si une circonstance exceptionnelle l'exigeait (infestation biologique localisée, déversement accidentel d'un produit polluant, etc.).

Nécessité d'une filtration

S'il est a priori sain, l'air extérieur n'est pas nécessairement pur. Il peut être le vecteur d'une pollution qui, pour être discrète, n'en est pas moins réelle, constituant un risque important pour les collections mais aussi pour le personnel⁸⁸. Cette pollution peut être de nature physique, chimique et biologique. L'air neuf introduit dans un bâtiment d'archives devra donc être impérativement filtré.

Filtrer physiquement l'air va consister à interposer sur le circuit imposé à l'air un média capable d'intercepter les particules qu'il transporte. On parle alors de filtration *particulaires*. Parmi ces particules, on peut trouver des poussières d'origine naturelle (sable, terre, etc.) ou industrielle, des fragments végétaux, des pollens, des spores, des amas de bactéries ou de virus, etc. L'efficacité de la filtration va dépendre des caractéristiques physiques du filtre en regard de la taille des particules à retenir, mais aussi de son degré d'encrassement. Celui-ci peut être estimé à partir de la perte de pression (dite *perte de charge*) qu'il induit dans un circuit d'air. Lorsque le filtre est propre, cette perte de charge est voisine d'une centaine de pascals⁸⁹. Elle s'accroît au fur et à mesure que le filtre se colmate

⁸⁷ Lars Christoffersen a mesuré le taux de renouvellement d'air dans les magasins de conservation des Archives régionales du Schleswig-Holstein par un traçage à l'hexafluorure de soufre (SF₆). Le taux mesuré était de 0,05 volume par heure [CHRISTOFFERSEN, 1995]. Wolf Buchmann, des archives de Coblenz, note de son côté, de manière assez radicale : « [...] 10 % of outside air [...] is still too much. Outside air not be taken in continuously, but only occasionally. [...] some fresh air every 2-3 weeks or even less should be sufficient. » [BUCHMANN, 1999].

⁸⁸ L'agence française pour la sécurité sanitaire de l'environnement et du travail a estimé qu'en 2002, 6,4 % des cancers du poumon étaient imputables à une exposition chronique à des particules fines (AFSSE. – *Impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine*, mai 2004). Sur cette importante question, voir également : P. PÈNE, R. MASSE. – « Air extérieur, air intérieur et santé », *Rapport à l'Académie nationale de médecine*, juin 2009.

⁸⁹ Noté « Pa », le pascal est l'unité légale de pression.

pour atteindre quelques centaines de pascals. Paradoxalement, plus un filtre particulaire s'encrasse et plus il est efficace ! C'est la raison pour laquelle son efficacité est toujours donnée pour une perte de charge de référence.

Au regard des normes NF EN 779⁹⁰ et NF EN 1822⁹¹, les filtres particuliers sont classés en quatre grandes familles :

- *Filtres grossiers* : quatre classes (G1 à G4) définies en fonction de leur efficacité de rétention d'une poussière synthétique pour une perte de charge finale de 250 Pa.
- *Filtres fins* : cinq classes (F5 à F9) définies en fonction de leur efficacité de rétention de particules de diamètre 0,4 µm pour une perte de charge finale de 450 Pa. Pour cette perte de charge, un filtre F9 retient 95 % des particules de 0,4 µm.
- *Filtres HEPA (High Efficiency Particulate Air)* : cinq classes (H10 à H14) définies en fonction de leur efficacité de rétention des particules les plus difficiles à stopper dont la dimension, nommée MPPS (*Most Penetrating Particle Size*), est comprise, selon les filtres et les vitesses d'air, entre 0,1 et 0,2 µm.
- *Filtres ULPA (Ultra Low Penetration Air)* : trois classes (U15 à U17). Le critère de classement est le même que celui utilisé pour les filtres HEPA. Un filtre U17 présente une efficacité minimale de 99,999995 %. Ceci correspond à un coefficient d'épuration 1000 fois plus grand que celui d'un filtre HEPA H14 ! Ces filtres aux performances exceptionnelles sont réservés aux applications très exigeantes : fabrication de produits stériles ou de micro-processeurs, laboratoire de recherche sur les bio-contaminations, etc. Il existe fort peu de chance qu'ils soient nécessaires et donc prescrits pour l'équipement d'un magasin d'archives.

Ainsi que cela a été mentionné, les performances des filtres particuliers augmentent avec leur degré de colmatage, mais le coût d'exploitation s'accroît également dans les mêmes proportions. Ainsi, un filtre F9 traversé par un débit d'air d'un mètre cube par seconde à la perte de charge nominale de 450 Pa, impose une puissance supplémentaire de

⁹⁰ NF EN 779 « Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules – Détermination des performances de filtration », février 2003.

⁹¹ NF EN 1822, « Filtres à air à très haute efficacité et filtres à air à très faible pénétration (HEPA et ULPA) », octobre 1998.

750 W au ventilateur qui pulse l'air dans les conduits. Un filtre qui fonctionnerait toute l'année avec cette perte de charge, serait responsable à lui seul d'une consommation électrique de 6 570 kWh, soit une dépense de 400 à 700 € (selon les tarifs applicables de l'électricité en 2009). Il est donc nécessaire de choisir avec beaucoup de soin le niveau de colmatage final à retenir en fonction des performances à obtenir et d'un coût d'exploitation acceptable. Ce calcul d'optimisation devra être conduit en tenant compte du coût du renouvellement d'un filtre et du coût marginal du kilowatt-heure qui dépend de la nature du contrat passé avec le distributeur d'électricité.

De son côté, la norme NF EN 13779 indique que pour des locaux dont la qualité de l'air intérieur est élevée (classe INT 1), la classe d'efficacité minimale des filtres est F9, y compris lorsque l'air extérieur est jugé « pur » (classe ANF 1). Si un magasin de conservation d'archives doit bénéficier d'une ambiance où la qualité de l'air est élevée (selon les critères de la norme), le niveau de filtration F9 doit être retenu en choisissant, cependant, la perte de charge optimale.

La filtration particulaire n'est pas toujours suffisante. Si l'environnement de l'établissement qui abrite la collection à protéger est fortement pollué (c'est presque toujours le cas en zone urbaine), une filtration *moléculaire* doit être envisagée.

Contrairement au cas de la filtration physique, l'efficacité de la filtration chimique a tendance à diminuer avec le degré de « colmatage ». La purification chimique est assurée par une substance capable de capturer les polluants gazeux par adsorption (→ LEXIQUE). La plupart des filtres moléculaires contiennent du *charbon actif* (→ LEXIQUE).

Pour éviter son colmatage rapide, un filtre moléculaire doit être protégé en amont par une unité de filtration particulaire très efficace. À cet égard, les recommandations des fabricants de filtres chimiques rejoignent les indications de la norme NF EN 13779.

La question de la diffusion de l'air dans les magasins

Ainsi que cela a été rappelé plus haut, le traitement de l'air d'un magasin de conservation impose de définir un débit d'air neuf à introduire dans le local. En général, ce débit est très faible et ne permet pas d'assurer une diffusion suffisante de l'air dans le magasin. La qualité de la diffusion de l'air dépend largement de la variable appelée *taux de*

brassage définie plus haut comme étant le rapport du débit soufflé dans le local sur son volume. La plupart du temps, plus le taux de brassage est élevé, meilleure est la diffusion de l'air dans le local et plus grande est l'homogénéité de la température et de l'humidité relative.

Choix du taux de brassage

L'expérience montre qu'en dessous d'un taux de brassage égal à trois fois le volume du local chaque heure, le risque de stratification thermique dans le local est important. À rapport de mélange égal, un écart de température de l'air induit un écart inverse d'humidité relative. Toute inhomogénéité de température induira nécessairement une inhomogénéité de l'humidité relative. Par ailleurs, si on réduit le taux de brassage, on est contraint d'augmenter proportionnellement ce qu'il est convenu d'appeler les « écarts de soufflage ». Raisonons d'abord sur la température. Si, pour maintenir une température constante dans un local, il faut souffler 1 500 m³/h à une température supérieure de 5 °C à l'ambiance, une réduction de débit imposera un écart de soufflage plus élevé. Ceci constitue un facteur supplémentaire de dégradation de l'homogénéité des conditions climatiques internes. Le raisonnement s'applique à la correction hydrique. Une réduction du débit d'air soufflé impose d'accroître l'écart hydrique de soufflage, ce qui, dans certaines configurations, peut s'avérer problématique. Tout ceci milite pour l'adoption d'un taux de brassage relativement élevé.

Dernier argument, l'augmentation du débit soufflé dans un local accroît l'efficacité dynamique de la filtration. En cas d'apport d'un polluant dans un local, si le débit soufflé (et donc recyclé) est trop faible, il faudra beaucoup de temps pour décontaminer le local car la cinétique de décontamination sera ralentie. C'est ce phénomène qui impose de recourir dans les salles d'opération où la qualité bactériologique de l'air est indispensable, à des taux de brassage qui peuvent être supérieurs à 50 vol/h. Dans un laboratoire, on tourne autour de 8 à 10 vol/h. Un taux de brassage effectif dans un magasin d'archives compris entre 3 (minimum) et 5, n'a donc rien d'extravagant⁹².

Cependant, on ne saurait conclure sur cette question sans prendre en compte le coût d'un taux de brassage élevé. L'important déplacement d'air qu'il impose, est assuré par un

⁹² Pour mémoire, la DAF recommande un taux de brassage de l'air de 3 vol/h [DAF, 2009].

ventilateur dont la consommation électrique est proportionnelle à son débit aéraulique et aux pertes de charge qu'il doit vaincre. Plus le ventilateur est éloigné et le débit important, plus la satisfaction d'un taux de brassage élevé conduira à des coûts énergétique substantiels. Cette réalité incontournable est un bon argument pour des solutions technologiques comme les armoires de climatisation qui sont en général installées à proximité des locaux traités, quand bien même les fluides de chauffage ou de réfrigération qui les alimentent sont produits de manière centralisée.

Intérêt de la surpression

Il reste à évoquer la question de la surpression des magasins de conservation vis-à-vis des locaux voisins. Supposons que le débit soufflé dans un magasin soit supérieur au débit repris. Il s'en suit que le magasin sera en surpression par rapport aux locaux adjacents. Cette surpression sera d'autant plus importante que l'écart entre le soufflage et la reprise est important et que le local est étanche. Dans le cas d'un magasin de conservation, la mise en surpression systématique est une bonne option. Elle permet de s'assurer qu'en fonctionnement normal, le local ne subit pas d'infiltrations parasites apportant une charge hydrique et/ou des polluants indésirables en provenance de l'extérieur ou des circulations. Cette mesure est efficace à condition que le réglage des débits soufflés soit parfaitement réalisé par les entreprises en charge des installations sous le contrôle d'une maîtrise d'œuvre particulièrement vigilante. En tous cas, il convient que la surpression ne soit pas trop importante pour éviter de poser des problèmes d'ouverture de porte.

Lorsque le traitement d'air d'un magasin est assuré par une armoire de climatisation indépendante, il est aisé de réaliser une surpression en injectant l'air neuf dans le réseau du traitement d'air, sans compenser le débit supplémentaire par un accroissement équivalent de la reprise comme l'illustre la figure suivante.

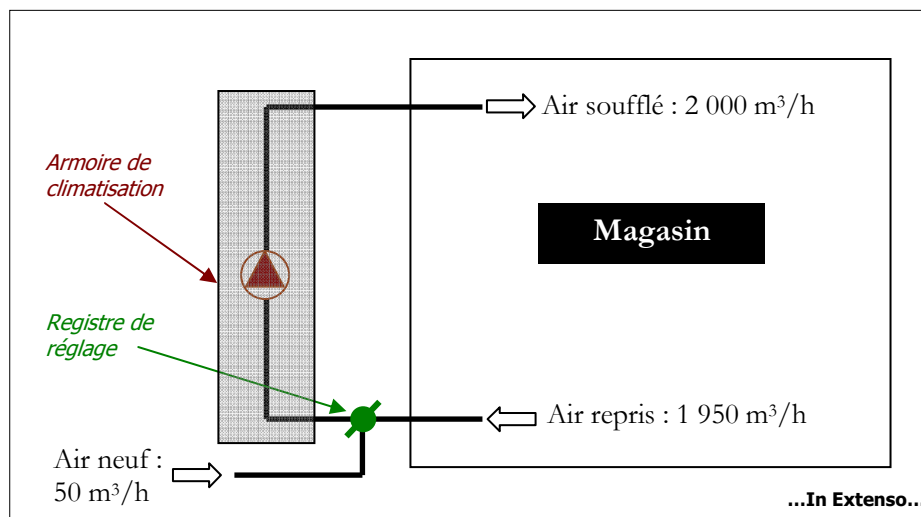


Figure 26 – Exemple de traitement aéraulique d'un magasin par une armoire de climatisation. La quantité d'air neuf injecté n'est pas reprise, induisant une mise en surpression du magasin.

Le cas des archives photographiques

Les problèmes spécifiques posés par les locaux abritant des archives photographiques méritent sans aucun doute quelques remarques particulières. L'instabilité chimique intrinsèque des matériaux constituant les documents photographiques a été soulignée dans le chapitre 2. Elle constitue un véritable défi pour la conservation. Aussi, est-on conduit à choisir des conditions climatiques beaucoup plus contraignantes pour les archives photographiques que pour les archives traditionnelles. La plupart du temps, on maintient dans les locaux des températures et des humidités relatives plus basses⁹³ que dans les magasins de conservation recevant des archives traditionnelles. Ces exigences plus contraignantes ont des conséquences sur le choix de construction et sur celui des équipements de climatisation.

⁹³ La norme NF ISO 11799:2003 (« Information et documentation – Prescriptions pour le stockage des documents d'archives et de bibliothèques », AFNOR, janvier 2004), suggère des valeurs de la température et de l'humidité relative en fonction de la nature particulière des documents photographiques : tirages ou négatifs, noir et blanc ou couleur, nitrate, acétate ou polyester, etc. Les valeurs recommandées par la norme figurent en annexe (p. 139).

Si l'on souhaite maintenir toute l'année une température de 10 °C et une humidité relative de 35 % dans un magasin spécialisé⁹⁴, il faut impérativement prévoir un renforcement de l'isolation thermique du local à la fois pour réduire les besoins énergétiques du traitement de l'air, mais aussi pour éviter que des condensations puissent se manifester sur les points froids induits à l'extérieur par les ponts thermiques de construction. Cette isolation thermique complémentaire doit concerner *toutes* les parois⁹⁵ ! Il faut aussi considérablement renforcer la résistance des parois au transfert hydrique. En effet, dans un local à basse température et basse hygrométrie, la pression de vapeur est très basse. Un flux de vapeur d'eau a donc tendance à s'établir entre le magasin froid et l'extérieur, ce qui peut poser des problèmes de conservation des matériaux de construction⁹⁶. En plus d'une bonne isolation thermique, toutes les parois devront par conséquent recevoir un pare vapeur efficace. On prendra garde de ne pas oublier le sol et le plafond et d'assurer une continuité sans défaut du pare-vapeur dans les liaisons entre parois. Une bonne option constructive peut consister à choisir de reconstruire une véritable boîte isolée dans le volume destiné à recevoir les archives photographiques, en faisant appel aux techniques très industrialisées des « chambres froides ».

Deuxième contrainte. Elle est de nature technologique. En effet, avec les valeurs de température et d'humidité nécessaires à la bonne conservation des archives photographiques, les techniques traditionnelles de rafraîchissement et de déshumidification sont insuffisantes. Avec les conditions climatiques de conservation citées plus haut, 10 °C et 35 % d'humidité relative, la température de rosée est d'environ -4 °C. Or, il est impossible d'obtenir une telle température avec des batteries froides traditionnelles

⁹⁴ Il s'agit d'un exemple. Selon les cas, les niveaux à atteindre peuvent être plus ou moins rigoureux.

⁹⁵ Le sol en est une. L'absence de traitement thermique du sol est souvent à l'origine de graves désordres. L'isolation du sol pose le problème particulier de sa résistance mécanique vis-à-vis des charges transmises par le mobilier. En fonction de la nature de l'isolant choisi, il peut être nécessaire de disposer une plaque de répartition des charges sous les étagères.

⁹⁶ L'humidification des matériaux augmente leur conductivité thermique. Des condensations peuvent apparaître dans les matériaux si leur température est basse. Pour des valeurs négatives de la température, les condensations s'accompagnent de phénomènes de *gélifraction* des matériaux poreux.

alimentées en « eau glacée⁹⁷ ». Il convient donc de faire appel à d'autres technologies comme celle des batteries à détente directe⁹⁸ ou bien, plus couramment, ou celle des déshydrateurs utilisant des roues à adsorption. D'autres techniques existent mais l'expérience montre que celles qui ont été citées présentent le meilleur rapport efficacité / prix.

Que faire dans les locaux autres que les magasins ?

Les paragraphes précédents ont été essentiellement consacrés aux cas des magasins de conservation. Mais des éléments d'un fonds et d'une collection peuvent, au moins temporairement, quitter leur résidence principale et séjourner, plus ou moins longtemps dans d'autres locaux. Ils peuvent également voyager à la suite d'un prêt consenti à un autre établissement patrimonial. Ce cas particulier qui échappe au cadre de cet ouvrage, ne sera pas traité. En revanche, il convient de rappeler quelques principes applicables aux locaux destinés à recevoir temporairement des documents d'archives. Ces locaux sont essentiellement la salle de lecture, la salle d'exposition, la ou les salles de tri, le ou les ateliers de reliure et de restauration.

L'idéal serait qu'il n'y ait aucun écart climatique entre les magasins, lieu de séjour permanent des collections et les locaux cités que les documents d'archives n'occupent que de manière intermittente, mais cet idéal est difficile à atteindre ! La principale difficulté provient des besoins de confort des individus qui diffèrent des exigences climatiques des collections. Ainsi, pour autant que l'humidité relative demeure dans des plages raisonnables, le maintien de températures relativement basses dans les magasins constitue une excellente situation pour les documents. Cependant, pour les personnels en charge des documents

⁹⁷ Cette « eau glacée » descend rarement en dessous de 5 °C à la sortie des groupes frigorifiques chargés de la préparer. Il est évident qu'on ne saurait refroidir de l'air jusqu'à une température de - 4 °C avec un fluide à 5 °C.

⁹⁸ Dans les batteries à détente directe, c'est le fluide frigorigène qui passe directement dans la batterie sans fluide intermédiaire tel que l'eau. Il est donc possible de descendre beaucoup plus bas en température. Cependant, avec des températures négatives, se pose la question du givrage des batteries qu'il n'est pas toujours facile de gérer.

(classement, restauration, etc.), cela peut constituer une situation peu confortable, sinon problématique. Dans des établissements anciens où les magasins n'étaient ni chauffés, ni climatisés, ce problème se posait avec acuité. Aujourd'hui, cette situation est, sinon improbable, tout du moins plus rare. Le contrôle des conditions climatiques des magasins dans des plages somme toute modérées, permet d'envisager de traiter les locaux autres que les magasins de manière pratiquement identique. Cette stratégie a l'avantage de ne pas créer d'écart important entre par exemple les magasins et la salle de lecture, ou bien entre les magasins et les ateliers, ce qui minimise considérablement les risques de chocs thermiques ou hydriques pour les collections qui sont déplacées le temps d'une consultation ou d'une restauration.

Toutefois, une précaution spéciale devra être prise. Elle concerne les locaux de travail dont les équipements de régulation sont souvent soumis à une programmation tenant compte de l'inoccupation des locaux la nuit et le week-end. Il s'agit là d'une mesure parfaitement justifiée si l'on considère que le temps d'occupation de locaux de travail ne dépasse pas 1 800 heures par an, à comparer aux 8 760 heures d'une année non bissextile. Autrement dit, les locaux de travail sont vacants pendant plus des trois quarts du temps. Il est donc légitime d'y réduire le chauffage ou la climatisation en période d'inoccupation. Cependant, une exception devra être faite à cette mesure dans les locaux annexes où seront conservés des documents au-delà d'une journée de travail. C'est le cas, la plupart du temps des salles de tri et des ateliers. En revanche, la salle de lecture pourra bénéficier des réductions de température pendant l'absence du public car on suppose qu'en dehors des heures d'ouverture, aucun document patrimonial n'y subsiste⁹⁹.

⁹⁹ Dans les petits dépôts, il peut arriver que des documents séjournent plusieurs jours voire quelques semaines pour les besoins de lecteurs engagés dans des études à long terme. Dans de telle situation, il conviendrait d'exclure la salle de lecture des espaces où un ralenti de nuit ou de week-end est réalisé.

Traitement climatique des archives et « développement durable »

Amorcée dans les années 1970 avec l'émergence en France d'une architecture solaire et bioclimatique¹⁰⁰, la réflexion sur les liens organiques existant entre consommation d'énergie ou de matières premières, et atteintes à l'environnement planétaire, n'a cessé de se développer. Aujourd'hui le réchauffement climatique n'est plus mis en doute par la plus grande majorité de la communauté scientifique même si des interrogations subsistent sur l'amplitude de ce réchauffement, ses mécanismes détaillés, sa cinétique et sa réversibilité. Même si elle est tardive, la prise de conscience par les pouvoirs publics de cette situation préoccupante à bien des égards, trouve ses premières traductions dans une nette évolution des politiques d'aménagement du territoire, d'urbanisme et d'architecture. L'expression-slogan « développement durable » ne peut plus être ignorée ou moquée par les décideurs, pas plus que par les différents acteurs du monde de la construction dont les décisions pèsent lourds sur les consommations énergétiques. Le taux de renouvellement du parc automobile est rapide en regard de celui des bâtiments. Les préoccupations d'efficacité énergétique sont donc particulièrement importantes dans le secteur de la construction.

Parce qu'elles sont malheureusement tardives, ces préoccupations n'en deviennent que plus impératives. On ne saurait donc s'engager dans la construction d'un bâtiment d'archives sans les intégrer au processus d'élaboration du projet. Cet ouvrage a montré combien l'environnement climatique des collections influait sur leur conservation. Une question dès lors se pose : le maintien d'un environnement climatique adapté autour des collections est-il contraire à la démarche du développement durable ?

La réponse est heureusement non. La modération introduite dans les exigences climatiques intérieures en permettant que la température et l'humidité relative évoluent dans une plage élargie (voir notamment la **Figure 6**, page 15), la réduction considérable des taux de renouvellement d'air (voir le paragraphe « La question du renouvellement d'air », page 88) ouvrent la voie à des solutions architecturales et techniques qui réduisent de manière spectaculaire les consommations d'énergie par rapport aux solutions naguère adoptées, fondées sur une climatisation pure et dure. Par ailleurs, en exigeant des niveaux

¹⁰⁰ En témoigne cette référence : P. DIAZ PEDREGAL, O. FILLION. – Dossier : « Quelle architecture solaire ? », *L'Architecture d'aujourd'hui*, n° 192, septembre 1977.

de filtration élevée, des matériaux à faible taux d'émission de composés organiques volatils, afin de protéger les collections contre les risques de pollutions chimiques ou organiques, on crée simultanément des conditions de travail sensiblement améliorées pour le personnel travaillant dans les magasins. Toutes ces mesures vont incontestablement contribuer à inscrire les bâtiments d'archives parmi les constructions exemplaires en matière de développement durable, prouvant, dans le même temps, que les méthodes de la conservation préventive des collections sont en parfaite synergie avec les exigences de la protection de l'environnement.

Chapitre 5

Quelles sont les bonnes questions à se poser pendant l'élaboration du projet, sa réalisation et après sa réception ?

La réalisation d'un projet de construction impose de parcourir un long chemin que l'on dit, à tort ou à raison, semé d'embûches, truffé de pièges, creusé de chausse-trappes et propice aux traquenards. Pour limiter les difficultés qu'imposeront les obstacles à franchir, le plus simple est d'aborder un projet avec une méthode de gestion rigoureuse, en s'appuyant sur les acquis incontestables des plans d'assurance et de contrôle de la qualité qui se sont progressivement imposés dans la plupart des domaines de l'activité humaine et, tout particulièrement, dans le monde industriel. Le bâtiment est un des rares secteurs où une approche rationnelle de la production de projet peine à s'imposer¹⁰¹. Des raisons historiques, économiques, voire sociologiques peuvent être invoquées pour expliquer cette situation singulière. Dans le domaine de la conservation des biens culturels, les enjeux sont importants. Ce n'est rien moins que la sauvegarde de notre patrimoine qui est mis en cause lorsqu'un bâtiment ne répond pas aux attentes formulées par les futurs utilisateurs, notamment sur la question sensible des conditions climatiques intérieures.

Est-il possible de limiter considérablement, sinon éliminer totalement, le risque de problèmes futurs ? La réponse est oui à la condition que l'approche méthodologique adoptée pour la conduite de l'opération tienne compte des obstacles inhérents à l'entreprise. Ce chapitre a été conçu pour aider les décideurs à poser les bonnes questions,

¹⁰¹ On peut cependant citer quelques références bibliographiques intéressantes sur ce thème : G. CAREL. – *Le management de projet*, coll. « Repères », La Découverte, Paris, 2003 ; H. KLEIN. – *Gestion de projet*, Birkhäuser, Bâle, 2008 ; CERTU. – *Gestion de projet appliquée à la conduite d'opération – Repères méthodologiques*, Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Paris, 2000.

Cette définition s'applique exactement au cas d'un projet de construction. Pour vérifier ce point de vue, trois domaines où se manifeste cette complexité seront successivement examinés. Ils illustrent les difficultés rencontrées pour conduire un projet de construction de quelque importance, de ses premiers balbutiements jusqu'à son plein achèvement.

Complexité des objectifs à atteindre.

Idéalement, tout projet devrait commencer par une série d'études préalables visant à en vérifier l'opportunité et la faisabilité. Lorsqu'à la lumière de ces travaux préparatoires, les promoteurs du projet décident d'aller plus loin, un *programme* doit être établi par des professionnels spécialisés. Qu'est-ce qu'un programme ? Une réponse simple consiste à dire qu'il s'agit d'un document décrivant le plus précisément possible les objectifs quantitatifs et qualitatifs du maître d'ouvrage¹⁰⁴ pour le bâtiment qu'il souhaite faire réaliser. La loi MOP¹⁰⁵ propose une définition plus précise de ce qu'est un programme en décrivant son contenu :

« Le maître de l'ouvrage définit dans le programme les objectifs de l'opération et les besoins qu'elle doit satisfaire ainsi que les contraintes et exigences de qualité sociale, urbanistique, architecturale, fonctionnelle, technique et économique, d'insertion dans le paysage et de protection de l'environnement, relatives à la réalisation et à l'utilisation de l'ouvrage. »

Document fondateur d'un projet, le programme illustre parfaitement la complexité de l'entreprise. Les objectifs à atteindre sont fort nombreux et les performances attendues parfois contradictoires. Dans le seul domaine du contrôle climatique, il est fréquent de voir fixer des performances élevées en matière de stabilité des températures et des humidités relatives sans que, par ailleurs, le recours à la climatisation soit autorisé. Beaucoup de professionnels jugent ces exigences antinomiques. On comprend aisément que la réponse architecturale et technique à apporter à cette demande du programme sera complexe,

¹⁰⁴ L'initiateur ou le promoteur d'un projet se transforme en « maître d'ouvrage » lorsqu'il décide de donner une suite favorable à son projet de construction. Cette expression a un contenu juridique fort. Le maître d'ouvrage dispose de prérogatives importantes qu'il doit utiliser à bon escient.

¹⁰⁵ *Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.* De nombreux ajouts, corrections ont été apportés au texte de la loi. Une version consolidée peut être consultée sur le site officiel : <http://www.legifrance.gouv.fr/>.

d'autant plus complexe, au demeurant, que l'utilisation de technologies telle que la climatisation est proscrite. On pourrait multiplier les exemples.

Quoi qu'il en soit, l'expérience démontre systématiquement qu'une description insuffisante des performances attendues du bâtiment, autrement dit, un programme incomplet et/ou imprécis, ouvre la porte à d'innombrables difficultés et contestations dont la manifestation plus ou moins tardive est de nature à compromettre le déroulement, sinon l'achèvement, d'une opération.

Complexité de l'environnement administratif des projets.

Il ne sera pas nécessaire d'argumenter longtemps sur cet aspect de la complexité d'un projet. Pour peu qu'il ait été engagé, ne serait-ce qu'une seule fois, dans une opération de construction, le lecteur est en mesure de comprendre combien la diversité de statut des maîtres d'ouvrage et le nombre important des intervenants (maître d'ouvrage, maître d'ouvrage délégué, assistant au maître d'ouvrage, architectes, bureaux d'études, consultants, bureaux de contrôle, administrations diverses, etc.) contribuent à transformer la plupart des projets en redoutable « usine à gaz » administrative. Si le moindre doute subsistait sur cette complexité, il suffirait de jeter un coup d'œil à la librairie en ligne du Moniteur¹⁰⁶, un éditeur incontournable sur ces questions : à la seule rubrique « Contrats publics », on découvre une liste de 35 ouvrages¹⁰⁷. L'ensemble des publications présentées représentent des dizaines de milliers de pages¹⁰⁸ !

Complexité des études et de la réalisation.

La complexité des études de projet ne le cède en rien à celle de l'environnement technique. Pour n'en donner ne fût-ce qu'une idée, il suffit de rappeler quelques chiffres. Le *Code de la construction et de l'habitation* qui représente une petite partie du formidable édifice législatif et réglementaire applicable aux projets, mis à jour en permanence par les différents

¹⁰⁶ <http://www.editionsdumoniteur.com/pages/recsimp/framesin.asp?Catalogue=JU&Action=Rubriques&texte=Contrats+publics>

¹⁰⁷ Site consulté le 5 avril 2009.

¹⁰⁸ Le seul Code des marchés publics de Nicolas Charrel et Michel Guibal représente à lui seul 1 800 pages...

ministères concernés, comporte des milliers de lois, décrets et arrêtés¹⁰⁹ dont l'application a nécessité des centaines de circulaires ! Mais il faut aussi évoquer les dizaines de *Documents techniques unifiés*¹¹⁰ qui régissent les règles de conception des ouvrages¹¹¹ et les milliers de normes spécialisées applicables aux équipements et aux matériaux¹¹².

Comme chacun sait par ailleurs, un bâtiment résulte de la collaboration de très nombreuses spécialités différentes. Elles sont désignées par l'expression « corps d'état » dans les dossiers de consultation d'entreprises. Pour la réalisation d'un simple bâtiment d'habitation, on en dénombre communément une dizaine. Pour un bâtiment du secteur tertiaire, ce ne sont pas moins d'une vingtaine de métiers qui doivent coopérer à l'édifice commun.

Une dernière dimension de la complexité des études doit être évoquée : elle a trait à la spécificité de certaines disciplines. Si certains corps d'état nécessitent la mise en œuvre d'un ensemble de règles de l'art fondées essentiellement sur l'expérience, il n'en va pas de même de certaines spécialités comme l'étude des structures ou du climat intérieur des bâtiments qui ne peuvent se limiter au respect de quelques règles empiriques. Ces disciplines s'appuient désormais sur une approche très scientifique des lois de la physique et nécessitent la mise en œuvre de moyens de calcul très importants.

Les points clés à chaque étape du développement du projet

De même qu'il ne faut pas se laisser rebuter par les embûches qui, à un moment ou un autre, peuvent entraver le bon déroulement de toute entreprise, il faut accepter la

¹⁰⁹ Ce *Code de la construction et de l'habitation* est consultable en ligne dans sa version actualisée sur le site de Légifrance : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074096&dateTexte=20090412>.

¹¹⁰ Ils sont disponibles auprès du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) qui les regroupe dans une quarantaine de familles d'ouvrages : <http://boutique.cstb.fr/>.

¹¹¹ À terme remplacés par les *Eurocodes*, les Documents techniques unifiés (DTU) sont d'application obligatoire dans les marchés de construction attribués par l'État, les collectivités territoriales et les établissements publics. En tant que tels, ils constituent donc des textes de référence pour la réalisation des bâtiments publics d'archives.

¹¹² Voir plus particulièrement le site de l'Association française de normalisation (AFNOR) : <http://www.afnor.org/>.

complexité inhérente aux projets de construction et ne pas la considérer *a priori* comme une raison de se décourager. En l'admettant en tant que telle, la complexité devient une donnée identifiée du problème à résoudre. Elle conduit alors à choisir des méthodes de travail spécifiquement adaptées.

Pour réussir un projet dans un environnement fluctuant, il faut être en mesure de veiller constamment à ce que le processus d'étude ne diverge pas par rapport aux objectifs à atteindre. Mais la difficulté particulière de la conduite d'une opération de construction tient souvent à ce qu'il y a plus d'un pilote¹¹³ dans l'avion ! En effet, s'agissant de ce type d'opérations, on peut qualifier le processus d'élaboration de projet de *conception distribuée*, pour reprendre une expression forgée par les spécialistes de l'ergonomie cognitive¹¹⁴. La conception distribuée est un mode d'étude dans lequel « les acteurs de la conception qui sont simultanément (mais non conjointement) engagés sur le même processus de coopération accomplissent des tâches bien déterminées, celles-ci ayant été allouées préalablement, et poursuivent donc des buts (ou du moins des sous-buts) qui leur sont propres tout en ayant pour objectif de participer le plus efficacement possible à la résolution collective du problème¹¹⁵. »

Il convient donc d'adopter un mode de suivi de projet tenant compte de cette spécificité et permettant une évaluation périodique des propositions des concepteurs, à chaque étape d'élaboration des études, en regard des objectifs qui leur ont été assignés.

Dans les paragraphes qui suivent, seront listées quelques unes des questions les plus importantes qu'il convient de se poser à chacune des étapes de développement du projet. Ce questionnaire se limitera aux aspects qui relèvent de la conservation des archives,

¹¹³ Les règles internationales de l'aviation civile imposent la présence de deux pilotes dans le cockpit des avions de ligne : un commandant de bord et un copilote. Avant le décollage, alternativement, l'un des deux est désigné comme « pilote en fonction ». Le « pilote non en fonction » qui peut donc être le commandant de bord, assure les communications radio. À un instant donné, la responsabilité du pilotage est bien assurée par un seul individu.

¹¹⁴ L'ergonomie cognitive peut être définie comme l'étude des processus mentaux (perception, mémoire, raisonnement...) en regard de leurs effets sur les interactions entre les personnes formant un groupe professionnel.

¹¹⁵ F. DARSE, P. FALZON. – « La conception collective : une approche de l'ergonomie cognitive », *Compte rendu du colloque GDR-CNRS FROG « Coopération et Conception »*, Toulouse, 1^{er} – 2 décembre 1994.

notamment du point de vue du climat intérieur, mais la méthode sous-jacente peut s'appliquer à tous les aspects conceptuels et organisationnels d'une opération. Un commentaire sera ajouté à ces questions.

Lors des études préalables

- LE LINÉAIRE DES FONDS ET DES COLLECTIONS À ABRITER DANS LES FUTURS MAGASINS EST-IL PARFAITEMENT CONNU ?

Répondre à cette question qui n'est simple qu'en apparence, n'a, de fait, rien d'évident. Le linéaire existant est en général connu. Mais on construit pour une longue durée (30 ans, 40 ans...). Il convient donc de faire des estimations de croissance annuelle, ce qui n'est pas toujours très facile. La tendance est de prévoir « large ». Deux inconvénients de cette stratégie doivent être soulignés : le contrôle climatique d'un bâtiment à moitié vide n'est pas aisé. En effet, les collections assurant en quelque sorte leur propre régulation de l'humidité relative comme cela a été expliqué précédemment, le comportement de deux magasins abritant des linéaires d'archives très dissemblables, sera nécessairement différent. Si l'installation de traitement d'air est commune, sur la base de quels critères doit-on conduire l'installation ?

Par ailleurs, construire pour une capacité double, c'est accepter aujourd'hui un investissement pratiquement doublé lui aussi ainsi que des coûts de maintenance singulièrement accrus. Des questions inédites apparaîtront comme celle de savoir s'il convient de chauffer ou de rafraîchir les magasins vides ! Supposons que deux magasins soient mitoyens. L'un est plein et doit recevoir un traitement d'air. Si son voisin est vide et non chauffé, il se produira une zone froide en hiver sur la paroi commune, refroidissement local qui peut être à l'origine d'un développement de micro-organismes. Si les magasins excédentaires ne sont pas chauffés, il conviendra par conséquent de les isoler thermiquement. En développant l'analyse jusqu'au bout, on aboutit à la conclusion que dans une telle situation, tous les magasins doivent être isolés les uns par rapport aux autres ou bien, qu'ils soient vides ou pleins, ils devront recevoir le même traitement climatique. On conçoit donc que le choix du linéaire de rangement du futur bâtiment résulte d'un exercice d'optimisation particulièrement ardu.

- L'ÉTAT SANITAIRE DES ARCHIVES A-T-IL ÉTÉ ÉTUDIÉ ?

Le transfert des collections dans un nouveau bâtiment pose d'innombrables problèmes. Autant ne pas y ajouter celui de déménager, avec les archives, quelques foyers actifs de micro-organismes opportunistes. En général, la préparation d'un déménagement d'archives s'accompagne d'un examen de l'état sanitaire des documents, accompagné d'un dépoussiérage et d'un conditionnement, s'il n'existe pas et s'il est possible, des fonds et collections.

- LES CONDITIONS THERMOHYGROMÉTRIQUES DANS LESQUELLES SONT CONSERVÉES ACTUELLEMENT LES ARCHIVES ONT-ELLES ÉTÉ IDENTIFIÉES ?

Pour que le transfert des archives dans leur nouveau bâtiment s'opère sans stress hydrique ou thermique, il convient de bien connaître les conditions climatiques auxquelles les fonds et collections étaient soumis dans leurs anciens magasins. La connaissance de cette situation préalable permettra de définir un scénario de transition minimisant les risques du déménagement sur ce plan.

Lors de la phase de programmation

- LA DESCRIPTION DES CARACTÉRISTIQUES DU CLIMAT INTÉRIEUR À ASSURER EST-ELLE CLAIRE ET EXHAUSTIVE ?

Tout se joue avant le projet, c'est-à-dire avant l'intervention de l'architecte et son équipe d'ingénieurs. Un projet est une *réponse* à une *question*. Si la question est floue, incomplète, voire erronée, la réponse, autrement dit le projet, a peu de chance d'être pertinente. Il appartient donc à la maîtrise d'ouvrage de proposer un programme complet et approprié. C'est la condition nécessaire, mais sans doute pas suffisante, pour une réalisation parfaite.

En matière de climat intérieur des magasins, un programme de construction respectant l'esprit et la lettre de la loi MOP doit comprendre un chapitre exhaustif et sans ambiguïté sur la question. Le synopsis d'un tel chapitre est esquissé ci-après. Il s'appuie sur la structure d'un programme telle qu'elle résulte de la définition citée :

Besoins à satisfaire : la bonne conservation des archives.

Objectifs à atteindre : grande stabilité de la température et de l'humidité relative, absence de polluants physiques, chimiques et biologiques, conditions de conservation compatibles avec la présence humaine.

Contraintes et exigences : en fonction de la typologie des collections, magasin par magasin, on précise les principales cibles climatiques visées, à savoir :

- niveau des températures et des humidités relatives ;
- critère d'homogénéité des paramètres thermohygro-métriques ;
- amplitudes maximales des fluctuations quotidiennes ;
- niveau de qualité d'air ;
- protocole de sortie du magasin vers d'autres espaces (salle de lecture, salle d'expositions, salle de tri, ateliers...)
- accessoirement, niveau de bruit maximum des installations techniques (ventilation notamment).

On notera que l'énumération proposée adopte un point de vue « *performantiel*¹¹⁶ » et non « *exigentiel* ». Autrement dit, les exigences climatiques retenues par le conservateur doivent fixer des objectifs à atteindre (des performances) et non définir des solutions ou des options techniques (des exigences) imposées à la maîtrise d'œuvre. Le rôle des professionnels qui interviendront ultérieurement sera précisément de proposer des *réponses* techniques aux *questions* posées par le conservateur au travers du programme de construction.

D'autres contraintes ou exigences corollaires peuvent être précisées comme celles liées à la facilité de l'entretien et de la maintenance des équipements, à des coûts d'exploitation modérés, etc. C'est à ce stade qu'une réflexion portant sur la durée de vie espérée des documents et s'appuyant sur la méthode des isopermes (Voir le paragraphe « Le contrôle du climat permet d'accroître la durée de vie des archives », page 30) s'avère précieuse.

Les éléments précédents constituent un aide-mémoire. Il conviendra de mentionner des chiffres précis tirés, le cas échéant, des chapitres précédents.

¹¹⁶ La démarche performantielle a fait l'objet de nombreuses recherches et applications. Convaincue de sa pertinence, la Commission Européenne a appuyé cette approche en participant au lancement du réseau PeBBU (*Performance Based Building*). Le rôle de ce réseau est d'assurer la promotion de l'approche performantielle dans tous les pays de la Communauté européenne. Selon des simulations économiques, la mise en œuvre systématique de l'approche performantielle, à qualité constante des bâtiments, réduirait le coût global de la construction de 25 %.

Lors de l'avant-projet sommaire

- L'AVANT-PROJET SOMMAIRE EST-IL CONFORME AUX EXIGENCES DU PROGRAMME ?

L'avant-projet sommaire constitue la première étape permettant au maître d'ouvrage de vérifier que les stipulations de son programme ont bien été comprises par le maître d'œuvre et qu'elles ont été traduites correctement dans les pièces graphiques et écrites présentées. À ce stade préliminaire, peu de détails du projet apparaissent. En contrepartie, le maître d'œuvre peut proposer plusieurs solutions d'ensemble en réponses possibles au programme qui lui a été soumis. L'analyse de la ou des solutions avancées doit être faite d'une manière assez globale, ce qui peut s'avérer délicat. Il n'est pas toujours aisé d'imaginer ce que sera le projet final et ses caractéristiques fonctionnelles sur la base d'une description par définition sommaire. Si le maître d'ouvrage ne dispose pas en son sein des compétences techniques nécessaires, il peut être utile de faire appel à un consultant spécialisé dès cette première étape de projet¹¹⁷.

À l'issue du dialogue entre maître d'ouvrage et équipe de maîtrise d'œuvre, une seule option doit être retenue dont l'étude sera développée dans l'étape de l'avant-projet définitif.

Lors de l'avant-projet définitif

- LE PROJET DÉCRIT PAR LES PLANS ET CCTP CORRESPOND-IL EN TOUS POINTS AUX EXIGENCES DU PROGRAMME ?

Cette question est pratiquement identique à celle posée pour l'étape d'avant-projet sommaire. Y répondre précisément est absolument vital dans la mesure où, comme son nom l'indique, l'avant-projet est maintenant définitif. À l'étape précédente, il était encore possible de modifier telle ou telle caractéristique du projet. L'acceptation de l'APD par le maître d'ouvrage constitue un engagement sur lequel il demeure toujours possible de revenir mais au prix de coûteuses reprises d'études. Il apparaît par conséquent crucial qu'à ce stade d'avancement, le maître d'ouvrage soit totalement convaincu de la pertinence du projet présenté par l'équipe de maîtrise d'œuvre.

¹¹⁷ Ce thème est développé dans la référence suivante : P. DIAZ PEDREGAL. – « Un consultant, pour quoi faire ? », Compte rendu des Septièmes Rencontres Annuelles de la section « Archives départementales » in *Gazette des archives*, n° 209-210, 2008.

Un point particulièrement sensible apparaît à cette étape : c'est celui du choix des matériaux dont on sait l'impact qu'ils exerceront sur la qualité de l'air intérieur, facteur doublement important et pour le personnel et pour les collections. Le choix des revêtements intérieurs fait partie des questions sur lesquelles aucune concession ne peut être faite. Si le programme est précis dans la définition des objectifs à atteindre sur ce sujet, le contrôle des choix des maîtres d'œuvre devrait être facilité. Ainsi, on ne devrait plus jamais voir des parois en béton brut dans les magasins¹¹⁸.

- LE PLANNING PROJETÉ TIENT-IL COMPTE D'UNE PÉRIODE DE SÉCHAGE ET DE « PURGE » DU BÂTIMENT AVANT SA LIVRAISON ?

Pendant et après leur mise en œuvre, de nombreux matériaux libèrent dans l'air des substances qui peuvent compromettre la bonne conservation des collections. Le béton, en séchant, restitue une grande quantité de vapeur d'eau longtemps après qu'il a été coulé¹¹⁹. Parmi d'innombrables autres substances, les peintures, les colles, les solvants divers sont des sources identifiées de composés organiques volatils (COV) dont l'impact sur les documents est le plus souvent nuisible. Il importe donc qu'une période d'environ trois mois soit prévue à la fin du chantier de telle sorte que le bâtiment poursuive son séchage et que la plus grande quantité de COV soit éliminée. Le planning proposé par la maîtrise d'œuvre doit explicitement mentionner cette phase fondamentale pour garantir l'innocuité finale du bâtiment vis-à-vis des collections. Pendant cette période, les installations de traitement d'air, si elles existent, seront laissées en service continu afin de favoriser la « purge » souhaitée de l'air intérieur. Si l'installation technique prévoit une modulation possible du taux d'air neuf introduit dans le bâtiment, le réglage de ce taux sera fixé au maximum pendant cette période de purge. Cette dernière offrira un temps suffisant pour réaliser un dépoussiérage soigneux des locaux et des installations.

¹¹⁸ Pour réduire les coûts, on voit parfois proposer de simples traitements anti-poussière sur les parois en béton des magasins. Cette solution n'est qu'un pis-aller, renvoyant les problèmes à plus tard. La durée de vie de ses revêtements ne dépasse guère 5 à 10 ans. Il faudra donc prévoir de refaire ces revêtements alors que les collections seront en place. On peut se poser la question de savoir si cela est bien raisonnable.

¹¹⁹ Les procédés de construction pourront faire appel au maximum à la préfabrication de telle sorte que le chantier soit limité, le plus souvent possible, à un montage d'éléments dont le séchage est déjà bien avancé.

Lors de la préparation du dossier de consultation des entreprises

- LES MOYENS DE CONTRÔLE DES PERFORMANCES À ATTEINDRE SONT-ILS SUFFISAMMENT EXPLICITÉS ?

Avant de commenter cette question, il convient d'insister sur un point important. La réalisation du dossier de consultation des entreprises (DCE) marque une transformation radicale de perspective. Jusqu'à l'APD, l'équipe de maîtrise d'œuvre s'adressait au maître d'ouvrage, lui décrivant de plus en plus précisément son projet jusqu'à recueillir son approbation pleine et entière. Avec le DCE, la maîtrise d'œuvre change d'interlocuteurs ! Elle s'adresse désormais, en lieu et place de la maîtrise d'ouvrage, aux entreprises qui auront, le moment venu, la charge de traduire les plans et notices techniques en un bâtiment réel et fonctionnel. La lecture que doit faire la maîtrise d'ouvrage des documents qui lui sont désormais soumis, doit tenir compte de cette évolution majeure d'orientation.

De ce point de vue, l'une des nombreuses questions à se poser à la lecture du DCE est de savoir si les moyens de vérification des performances fixées aux installations de régulation du climat intérieur des magasins que devront réaliser les entreprises, sont suffisants. La rédaction des CCTP¹²⁰ est, sur ce point, essentielle. Supposons que l'une des performances attendues de l'installation climatique soit de garantir une amplitude des variations de la température dans les magasins de conservation inférieure à 1 °C par jour. Comment vérifiera-t-on que cette exigence est bien satisfaite ? Les indications trouvées habituellement dans les CCTP sont notoirement insuffisantes dans ce cas. On peut en général y lire une vague et routinière mention d'essais conformes aux directives COPREC¹²¹. Le problème est que ces directives COPREC s'intéressent au bon fonctionnement des équipements techniques mais ne traitent pas la question essentielle des

¹²⁰Un cahier des clauses techniques particulières (CCTP) doit être proposé pour chaque « lot » technique décrit par le DCE. Les CCTP doivent comporter une description très précise et très complète de ce qui est demandé aux entreprises. Après qu'une entreprise a été retenue pour la réalisation d'un lot, le CCTP devient une pièce essentielle du marché qui lie l'entreprise au maître d'ouvrage. C'est à lui qu'on se réfère pour savoir si telle disposition, non requise du point de vue de la réglementation, des documents techniques unifiés (DTU) ou des normes d'application obligatoire, est due ou non par l'entreprise.

¹²¹ La dernière version « Document technique COPREC Construction – Octobre 1998 » a été publiée dans *Le Moniteur*, n° 4954, 6 novembre 1998.

valeurs de la température ou de l'humidité relative dans les locaux. Il appartient donc aux maîtres d'œuvre d'élaborer des protocoles détaillés de réception permettant, le moment venu, de vérifier que les objectifs du programme sont bien atteints.

L'annexe « Exemple de protocole de réception des conditions climatiques dans un magasin de conservation d'archives » (page 141), suggère quelques pistes pour traiter cette question.

Pendant le chantier

- LES SPÉCIFICATIONS DES CCTP RELATIVES AUX TECHNIQUES ET AUX MATÉRIAUX SONT-ELLES SCRUPULEUSEMENT RESPECTÉES ?

Il n'est pas rare que pendant le chantier, les entreprises retenues après l'appel d'offres soient tentées de procéder à une certaine « optimisation » de leurs achats. À leur tour, elles vont procéder à des consultations de leurs fournisseurs pour tenter d'obtenir des prix plus bas que ceux qu'elles avaient estimés dans leur offre. La tentation est alors grande de rogner sur les quantités, la qualité ou, plus subtilement sur les puissances installées. Un groupe frigorifique de 500 kW, d'un type et d'une marque donnés, coûte évidemment moins cher que le même modèle d'une puissance de 600 kW. Autre exemple : une centrale de traitement d'air de 20 000 m³/h est moins onéreuse que deux centrales de 10 000 m³/h. La souplesse et la sécurité de fonctionnement ne sont évidemment pas les mêmes dans les deux cas. Le bureau d'études tout d'abord, mais aussi le maître d'ouvrage, doivent systématiquement s'interroger sur les changements de prestations afin d'en identifier les raisons et les conséquences (y compris financières).

Cela ne signifie pas qu'il faut systématiquement refuser tout changement. Mais chaque modification, préalablement à sa mise en œuvre, devra être faire l'objet d'une fiche d'identification détaillée qui documentera les raisons de cette modification, les conséquences prévisibles en termes de fonctionnement, d'exploitation ainsi que les répercussions en termes de plus ou de moins-values pour le projet. Bien entendu, chaque modification proposée par les entreprises devra recevoir l'accord *préalable* de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage.

Après la réception

- LE DOSSIER DES OUVRAGES EXÉCUTÉS EST-IL COMPLET ?

Conformément aux dispositions des marchés publics de construction, un dossier des ouvrages exécutés (DOE) doit être remis à la maîtrise d'ouvrage¹²². Le contenu du dossier doit avoir été décrit en détail lors de la consultation de l'entreprise. On veillera à vérifier que non seulement le DOE est bien remis dans les délais prescrits mais aussi qu'il comporte toutes les pièces listées dans le marché.

Un DOE complet doit non seulement permettre une exploitation aisée des installations mais il doit aussi constituer une véritable mémoire de la construction. Bien entendu, après que son contenu aura été soigneusement vérifié, ce DOE devra être communiqué aux exploitants du bâtiment. Mais le maître d'ouvrage devra également en archiver un exemplaire afin de le rendre accessible aisément à tous les professionnels qui, un jour ou l'autre, devront intervenir sur le bâtiment. Il serait facile de citer des dizaines d'exemples de bâtiments récents et complexes pour lesquels on constate que le DOE a disparu, à supposer qu'il ait été remis ! On peut aisément imaginer le surcoût d'études qu'induit une telle négligence lorsque des opérations de maintenance ou même de simple entretien s'avèrent nécessaires.

Après le projet, la maintenance préventive

On se souvient de ce slogan né en 1968 : « Soyons réalistes. Demandons l'impossible ! » La cause de la conservation préventive justifie qu'il soit réhabilité et adapté aux exigences d'aujourd'hui sous la forme « Soyons volontaristes. Exigeons le "zéro défaut" ! » Il ne fait aucun doute que cette démarche sera difficile à mettre en œuvre. Pourtant, quand un objet est par trop exceptionnel compte tenu de son unicité et de son importance historique et artistique inestimable, aucun risque ne saurait être accepté. Tel ou tel ensemble d'archives entre-t-il dans cette catégorie ? Chacun répondra en fonction des fonds ou des collections dont il a la charge. Quoi qu'il en soit, la méthodologie de développement d'un programme spécifique de maintenance basé sur les principes fondamentaux de la conservation préventive, doit donc s'inspirer des méthodes mises en

¹²² Conformément aux dispositions de l'article 40 du *Cahier des clauses administratives générales applicables aux marchés publics de travaux* (CCAG-TRAVAUX).

œuvre dans certains secteurs de l'activité industrielle¹²³ où, précisément, la problématique du « zéro défaut » doit impérativement s'appliquer. Il s'ensuit que **la priorité doit être donnée à la maintenance préventive plutôt qu'à la maintenance curative**. L'expérience montre qu'il est moins coûteux pour la collectivité de prévenir une panne plutôt que de la réparer, le bénéfice étant d'autant plus important que le risque associé est lourd.

La description détaillée des conditions nécessaires à une mise en œuvre efficace d'une maintenance préventive est proposée dans de nombreux ouvrages¹²⁴. Il n'est donc pas nécessaire de la répéter ici. Il suffira de noter que la maintenance préventive nécessite l'élaboration d'un plan minutieux qui dépasse largement le simple comptage des temps de fonctionnement des principaux dispositifs techniques. Un programme complet de maintenance préventive doit reposer fondamentalement sur une identification et une analyse des risques¹²⁵.

La caractérisation d'un risque reposera sur deux étapes principales d'étude :

- l'identification du *potentiel* du danger ou, en d'autres termes, de ses conséquences ;
- la détermination de la *probabilité* de survenue du danger.

L'analyse permettra ensuite d'élaborer une liste des organes techniques dont le fonctionnement est crucial pour la conservation des archives. L'élaboration du plan de maintenance préventive peut alors être poursuivie de manière classique en portant cependant l'accent sur deux points clés : la définition de *qui intervient* pour chaque action recensée et *dans quel délai*.

¹²³ Deux peuvent être cités: le domaine aéronautique et celui de l'industrie nucléaire. Ces deux secteurs ont en commun de considérer que le risque d'un accident n'est pas acceptable car ses conséquences seraient trop lourdes pour la collectivité en termes de pertes humaines et/ou économiques.

¹²⁴ Pour aller plus loin sur cette question, on peut consulter : J. HENG. – *Pratique de la maintenance préventive*, Dunod, Paris, 2005 ainsi que F. MONCHY. – *Maintenance – Méthodes et organisations*, Dunod, Paris, 2003.

¹²⁵ Rappelons quelques définitions de base. *Danger* : ce qui menace ou compromet la sûreté ou l'existence de quelqu'un ou de quelque chose de manière tangible. C'est aussi la situation qui en résulte. *Risque* : danger éventuel plus ou moins prévisible.

En dépit de toutes les précautions prises, une panne peut néanmoins survenir. Place alors à la maintenance curative. Les principes énoncés plus haut peuvent néanmoins continuer d'être appliqués. Si le plan de maintenance préventive a permis d'élaborer une liste des équipements sensibles, il devient possible d'approvisionner des pièces détachées dont on sait que les délais de livraison sont importants. Ainsi, en cas de panne survenant malgré les précautions prises, il devient possible d'intervenir rapidement et donc de limiter les temps d'indisponibilité des équipements et, par conséquent, l'impact climatique sur les collections.

Le suivi du climat : une responsabilité du conservateur

Le suivi du climat intérieur des magasins est une exigence de conservation. Il serait pour le moins inconséquent de consacrer beaucoup de temps et d'argent pour créer autour des collections un environnement climatique favorable à la conservation, puis de penser que les équipements mis en place vont nécessairement fonctionner comme cela était prévu, sans contretemps, sans arrêt, sans panne. Le contrôle du climat intérieur effectif est donc une exigence incontournable, comme l'on dit aujourd'hui. Pratiquement, comment peut-on assurer ce contrôle ? Comment créer un véritable *système d'information climatique* dans les espaces de conservation ?

De nombreux bâtiments sont aujourd'hui équipés d'un système unique de gestion de leurs équipements techniques. Baptisés GTC (gestion technique centralisé) ou GTB (gestion technique du bâtiment), ces dispositifs ont pour principal objectif de faciliter l'exploitation des édifices bénéficiant d'équipements de plus en plus nombreux et complexes : climatisation, éclairage, contrôle des entrées et des sorties du personnel et des visiteurs, etc. Pour des raisons réglementaires, la gestion des alarmes incendies est, la plupart du temps, assurée par une centrale spécialisée distincte de la GTB mais à laquelle elle peut éventuellement être raccordée.

Pour assurer ces fonctions de pilotage des équipements de traitement du climat intérieur des bâtiments, la GTB utilise de nombreuses sondes de température et d'humidité relative disposées dans les locaux ou dans les gaines d'air (soufflage ou reprise). Il est donc tentant d'utiliser la GTB pour assurer le suivi climat dans les différents locaux de

conservation. Bien que cette possibilité ait été retenue dans plusieurs bâtiments d'archives, elle présente de nombreux inconvénients qu'il importe de relever :

- Arrêt des mesures si l'installation de GTB est en panne. Situation problématique au moment même où il est particulièrement important de suivre les conséquences de cette panne sur le climat des espaces de conservation.
- Les sondes de mesure de la GTB ne sont pas toujours placées là où sont les collections pour des raisons techniques qu'il est difficile de contourner.
- La qualité métrologique des sondes de la GTB ne correspond pas toujours à celle requise pour la surveillance du climat autour de collections patrimoniales¹²⁶.
- Difficulté pour récupérer les données sur le système informatique de la GTB. Les techniciens apprécient rarement l'intrusion des conservateurs dans un domaine qu'ils considèrent comme étant de leur seule compétence.

Le choix d'utiliser la GTB pour assurer la surveillance du climat intérieur du point de vue de la conservation est donc une option « économique », puisqu'elle évite d'investir dans un réseau d'appareils indépendants, mais elle se paye par une série d'inconvénients qu'il n'est pas excessif de qualifier de rédhibitoires. Il conviendra donc de choisir d'installer un réseau de mesure indépendant du système de contrôle du climat.

Le choix des appareils de mesure doit être fait sur la base d'une consultation des fournisseurs spécialisés sur la base d'un cahier des charges fixant les performances à atteindre pour ce réseau de surveillance. Parmi les points à définir figureront sans aucun doute les suivants :

- nombre d'appareils à installer ;
- type d'appareil¹²⁷ (enregistreurs numérique autonomes, sondes en réseau, enregistreurs à liaison radio, etc.) ;

¹²⁶ Beaucoup de sondes d'humidité relative utilisées dans les installations de climatisation sont données avec une précision de $\pm 5\%$. Cette précision est insuffisante dans un local où l'on souhaite que l'humidité relative ne varie pas de plus de 5 % dans la journée tout en respectant une valeur cible fixe.

- mode de recueil des données enregistrées (manuel, automatique par réseau internet, automatique par radio, combinaison de plusieurs de ces modes) ;
- qualité métrologique des appareils ;
- taille de la mémoire pour les appareils autonomes.

Après la mise en service du réseau de mesure indépendant, il conviendra d'élaborer des procédures de dialogue et d'alerte entre la conservation et les services techniques en charge du bâtiment d'archives de telle sorte que tout dysfonctionnement détecté par la conservation soit signalé au personnel responsable, et que les mesures correctives puissent être appliquées rapidement. L'expérience montre que cette étape est délicate en ce qu'elle peut bousculer des habitudes ou des hiérarchies. Son bon déroulement est pourtant la condition nécessaire pour que tous les efforts consentis pour la bonne conservation des fonds et collections ne soient pas, *in fine*, compromis, voire réduits à néant.

¹²⁷ Il est un point sur lequel il ne peut y avoir discussion : l'ère des enregistreurs autonomes du type thermohygrographes à tambour ou à disque est achevée. Les appareils numériques sont aujourd'hui à la fois moins chers et plus fiables.

En guise de conclusion

Au cœur d'un projet de conservation d'archives, la concertation

Bornons ici cette carrière :
Les longs ouvrages me font peur.
Loin d'épuiser une matière,
On n'en doit prendre que la fleur.

Jean de La Fontaine, *Fables*, « Épilogue du livre VI », Ars Mundi, 1996, p. 212.

Assurer une conservation à très long terme de cet irremplaçable patrimoine que constituent les archives, qu'elles soient privées, municipales, départementales ou nationales, impose en premier lieu de bien connaître les propriétés singulières du papier en regard de son environnement (→ CHAPITRES 1 ET 2). Cela suppose également que l'on soit capable de créer et maintenir dans les magasins, autour des collections, une ambiance tempérée et parfaitement stable, quelles que soient les fluctuations largement imprévisibles du climat extérieur (→ CHAPITRE 3). Cette préoccupation conduit à s'interroger : faut-il climatiser ou non les espaces où sont conservées les archives (→ CHAPITRE 4) ? Au terme de cet ouvrage, il est permis d'esquisser une réponse. La climatisation n'est ni l'amie, ni l'ennemie des collections ! À l'instar de toutes les technologies, elle n'est qu'un outil, et, à ce titre, n'est en soi ni bonne, ni mauvaise. Il appartient à la maîtrise d'ouvrage tout comme à la maîtrise d'œuvre d'y recourir à bon escient et de l'utiliser, le cas échéant, de manière appropriée au terme de l'étude d'un projet qui doit être conduit avec méthode (→ CHAPITRE 5).

Les édifices très techniques que sont devenus les bâtiments d'archives mobilisent des technologies sophistiquées dont on peut parfois se demander si elles peuvent être totalement maîtrisées par ceux qui les prescrivent (les bureaux d'études), ceux qui les

installent (les entreprises) et ceux qui les gèrent (les exploitants) compte tenu des contraintes économiques fortes auxquelles ils sont soumis.

La difficulté singulière induite par une technologie hypertrophiée est double. D'une part, la panne la plus triviale peut avoir de grandes répercussions sur l'ensemble du bâtiment. D'autre part, lorsque les systèmes techniques atteignent un haut degré de complication, débusquer une modeste anomalie peut nécessiter un temps considérable et mobiliser des spécialistes de très haut niveau dont la disponibilité n'est pas toujours assurée. L'expérience fait apparaître que le recours à des technologies de pointe, s'il est flatteur pour les promoteurs d'un projet, s'accompagne d'une *fragilisation* réelle du fonctionnement. L'ensemble « bâtiment – équipements techniques » devient vulnérable à la moindre défaillance du système de gestion technique.

Dans des secteurs de l'activité humaine où le risque d'incident grave et, *a fortiori*, d'accident doit être éliminé à tout prix, des moyens financiers peuvent être mobilisés pour assurer une redondance des organes sensibles afin de garantir une disponibilité de l'équipement exempt de toute panne qui pourrait compromettre la sécurité des personnes ou l'intégrité des biens¹²⁸. La plupart du temps, pour un bâtiment d'archives, les maîtres d'ouvrage n'ont pas les moyens de doubler, voire de tripler les sécurités afin d'assurer un fonctionnement sans faille de leurs équipements. Malheureusement, le « zéro défaut » demeure, aujourd'hui encore, un objectif largement inaccessible économiquement parlant. Pourtant, c'est dans cette direction que chacun doit multiplier ses efforts.

Il serait erroné de conclure qu'il faut bannir toute technologie des bâtiments d'archives. Là encore, il convient de ne pas confondre l'équipement et l'usage qu'on en fait. Le choix d'une technique appropriée pour satisfaire un besoin clairement exprimé ou assurer une fonction correctement définie, est à l'évidence la bonne manière de commencer. Mais ce n'est pas suffisant. La plupart du temps, le recours à une technologie, quelle qu'elle soit, impose d'appliquer des procédures spécifiques de conception, de mise en œuvre et de gestion. Les problèmes naissent du fait que, dans beaucoup de cas, ces

¹²⁸ Le système de pilotage de l'Airbus A320, premier avion civil à commandes électriques, comporte trois ordinateurs indépendants. Deux ordinateurs de base programmés avec des langages différents par des équipes différentes, calculent les paramètres de vol simultanément mais indépendamment. Le troisième ordinateur veille à la cohérence des calculs des deux autres et alerte le pilote en cas d'écart significatif sur les résultats.

procédures ne sont pas appliquées. Ce faisant, de fortes contradictions se manifestent alors dans l'équipe de projet, conduisant à des oppositions qui, si elles ne sont pas dépassées à temps, se transforment en conflits. Le conflit n'est pas une fatalité. Il ne se produit que lorsqu'on a laissé des incompréhensions se développer jusqu'à de véritables affrontements. Les antagonismes qui en résultent doivent être considérés comme des symptômes d'échec. Il faut donc les détecter suffisamment tôt pour être en mesure de les limiter, sinon les éradiquer totalement. Il revient au maître d'ouvrage de s'organiser pour que les relations entre tous les professionnels collaborant à l'opération demeurent à un niveau de « fluidité » le meilleur possible. Certes, le grand nombre d'individus, de spécialités, de cultures, d'intérêts, que mobilise un projet de construction, ne facilite pas la tâche. Mais on ne saurait réussir l'édification d'un bâtiment fonctionnel et performant sans comprendre qu'un bâtiment ne résulte pas de la simple addition de propositions motivées par des intérêts particuliers, mais plutôt de la synergie d'actions coordonnées et soigneusement évaluées à toutes les étapes du projet.

Dans ce domaine, l'une des clés de la réussite réside dans la capacité du maître d'ouvrage à développer une communication rapide, claire et adaptée dans une perspective essentielle, celle d'une permanente concertation. Rapide, car les échanges ne s'accommodent plus désormais de la lenteur qui a longtemps été reprochée, parfois à tort, aux administrations. Claire, car l'information n'a de prix que par la qualité des messages qu'elle délivre. Adaptée, car tous les intervenants ont besoin d'une information pertinente, arrivant au moment où elle est nécessaire pour la réalisation de la tâche à accomplir.

Immarcescible mémoire d'une nation, les archives constituent les bases tangibles de son histoire. Leur conservation représente un devoir ! Chacun, pour sa part, doit y contribuer. Le maître d'ouvrage et ses consultants, l'architecte et ses bureaux d'études, les entreprises et leurs sous-traitants, et bien d'autres encore. Réussir un bâtiment d'archives, pouvoir y maintenir un climat adapté et permanent afin d'assurer aux documents une conservation meilleure et donc une espérance de vie prolongée, représentent des enjeux intellectuels et sociaux stimulants. En rappelant quelques-unes des bases scientifiques et techniques indispensables à la réussite d'un projet, cet ouvrage y aura peut-être modestement contribué.

Annexes

- Le comportement thermohygométrique du papier 129
- Comparaison d'une sollicitation climatique et de la réponse d'un bâtiment 135
- Conditions climatiques recommandées par la norme ISO 11799:2003 139
- Exemple de protocole de réception des conditions climatiques dans un magasin de conservation d'archives 141
- Définitions de quelques notions fondamentales 147
- Références bibliographiques 157

Le comportement thermohygométrique du papier

Quelle est la masse d'une feuille de papier ? Pour répondre à cette question, il ne suffit pas de connaître la dimension de cette feuille et son grammage. La Figure 28 montre le résultat d'une série de mesures réalisée avec une feuille de papier blanc ordinaire (80 g/m^2) de format A4. L'expérience a été conduite sur plusieurs semaines avec une balance de précision¹²⁹.

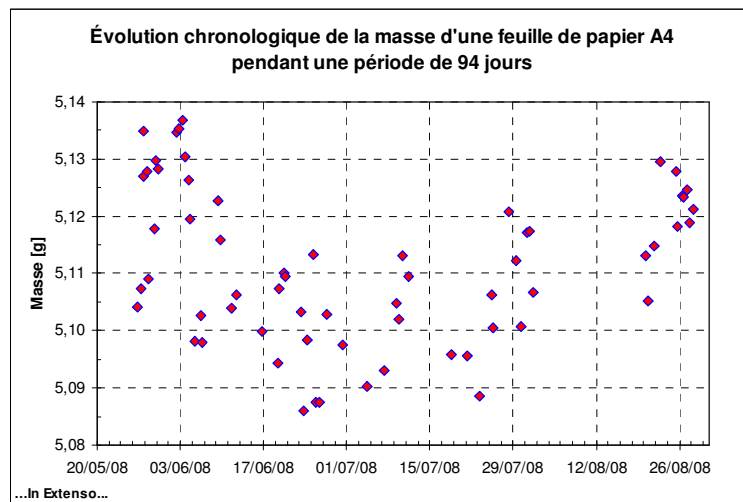


Figure 28 – Évolution de la masse d'une feuille de papier A4.

Si la qualité des mesures n'est pas en cause, comment expliquer ces variations apparemment aléatoires de la masse de la feuille ? La réponse est apportée par la **Figure 29** sur laquelle les mesures de la figure précédente ont été représentées en même temps que l'humidité relative du laboratoire dans lequel les pesées ont été faites.

¹²⁹ Incertitude inférieure au millième de gramme.

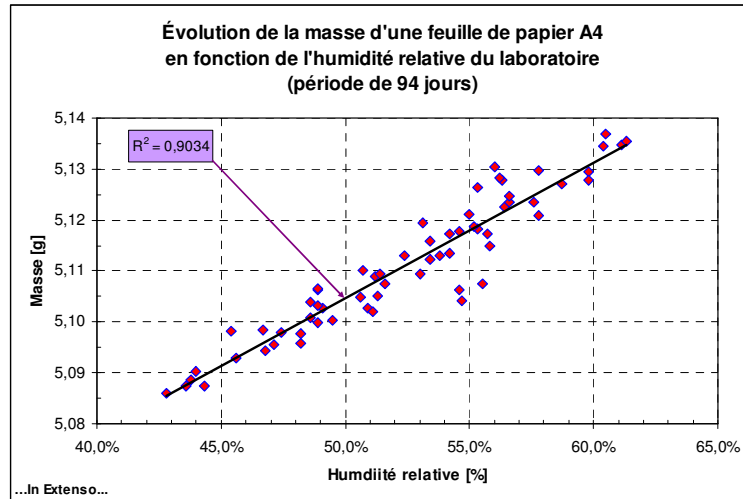


Figure 29 – Représentation du résultat des pesées de la feuille de papier en fonction de l'humidité relative du laboratoire.

La **Figure 29** fait apparaître clairement la dépendance existant entre la masse d'une feuille de papier et les caractéristiques hydriques de l'ambiance dans laquelle elle se trouve. Le coefficient de corrélation R^2 figurant sur le graphique confirme que la relation mise en évidence ne relève pas du hasard. Elle est la conséquence des propriétés d'hygroscopicité (→ LEXIQUE) du matériau.

Un matériau hygroscopique peut contenir une certaine quantité de vapeur d'eau désignée habituellement par l'expression *contenu en eau*¹³⁰ que l'on note *CE*. Ce contenu en eau se définit par l'expression :

$$CE = \frac{m_e}{m_s},$$

dans laquelle m_e est la masse d'eau contenue dans le matériau hygroscopique et m_s sa masse sèche.

L'expérience montre que ce contenu en eau est variable et que cette variabilité est dépendante d'une part de la température et, d'autre part, de l'humidité relative de l'ambiance. Il est possible de déterminer en laboratoire la relation entre les conditions environnementales avec lesquelles un matériau hygroscopique est en équilibre, et son

¹³⁰ Dans la littérature scientifique anglophone, le contenu en eau est désigné par l'acronyme EMC (*Equilibrium Moisture Content*), notation parfois employée par certains auteurs français.

contenu en eau. Elle s'exprime par des courbes appelées « isothermes d'adsorption » (→ LEXIQUE). Bien entendu, les isothermes sont différentes d'un matériau à l'autre. La figure suivante montre de telles courbes pour le papier ordinaire.

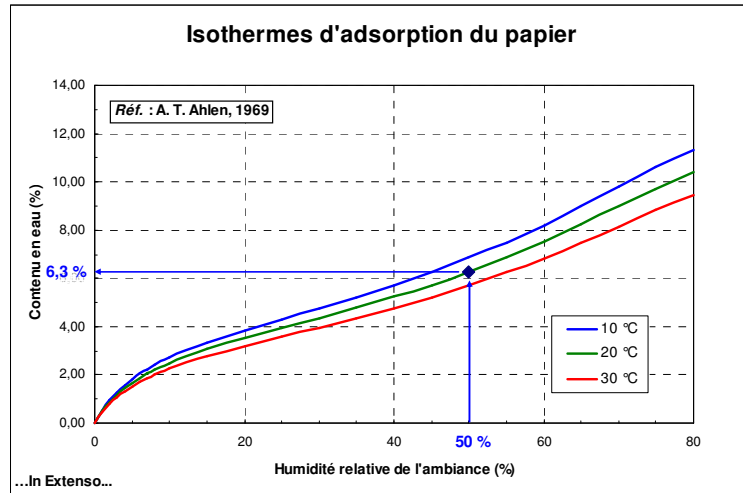


Figure 30 – Isothermes d'adsorption du papier calculées pour trois températures.

Sur le graphe précédent, le point représenté à titre d'exemple indique le contenu en eau du papier lorsqu'il est en équilibre hydrique avec une ambiance stable à 20 °C et 50 % d'humidité relative. Pour ces conditions, on trouve une valeur du contenu en eau de 6,3 %. En d'autres termes, une feuille dont la masse est de 5 grammes contiendra 0,063 fois m_s grammes d'eau. En s'appuyant sur la relation de définition du contenu en eau, on peut écrire l'équation :

$$m_s + 0,063 \cdot m_s = 5.$$

On en déduit la valeur de m_s :

$$m_s = 5 / (1 + 0,063) \text{ soit } m_s = 4,7 \text{ g.}$$

La masse d'eau m_e contenue dans la feuille vaut donc $5 \text{ g} - 4,7 \text{ g} = 0,3 \text{ g}$. Une ramette de papier de 500 feuilles et dont la masse mesurée à un certain moment dans les conditions climatiques indiquées plus haut est de 2,500 kilogrammes, aura par conséquent un contenu en eau de 150 grammes pour une masse sèche de 2,350 kilogrammes.

Ce graphe permet également de voir que, pour une même humidité relative, si la température augmente, le contenu en eau à l'équilibre a tendance à diminuer, tandis qu'il s'accroît si la température baisse. À température constante, le contenu en eau varie cette

fois-ci dans le même sens que l'humidité relative, mais la forme de la courbe montre que cette variation n'est pas linéaire.

Pour illustrer le comportement du papier¹³¹, supposons que la ramette précédente soit placée dans une vitrine parfaitement étanche dont le volume est égal à un mètre cube. Les conditions climatiques de départ dans cette vitrine sont supposées identiques à celles de l'ambiance, soit une température de 20 °C et une humidité relative de 50 % tandis que la pression atmosphérique est mesurée à 100 000 Pa. Conformément à ce qui a été dit précédemment, le contenu en eau de la ramette est de 150 g. Un bilan hydrique complet du système physique décrit oblige à tenir compte non seulement de la vapeur d'eau présente dans le papier mais aussi dans l'air de la vitrine. Le calcul permet de déterminer cette quantité. Elle est de 8,7 g. On observe qu'il y a 17 fois moins de vapeur d'eau dans l'air que dans la ramette.

Que se passera-t-il dans la vitrine si la température à l'extérieur change ? Notons tout d'abord que s'il n'y a pas d'apport ou de soustraction de vapeur d'eau dans l'ambiance et que la température augmente, alors l'humidité relative va diminuer. Inversement, si la température baisse, l'humidité relative sera plus élevée (→ LEXIQUE). La vitrine étant très faiblement isolée sur le plan thermique, elle supportera les fluctuations de la température du local où elle est installée. Sa propre température suivra donc de très près celle du local. En ira-t-il de même de l'humidité relative à l'intérieur de la vitrine ? En l'absence de la ramette de papier, la réponse sera évidemment oui. Les mêmes causes produisant les mêmes effets, si la température dans la vitrine augmente, il faut s'attendre à ce que l'humidité relative diminue. Pourtant, ce n'est pas du tout ce qui est observé comme le montre la **Figure 31** obtenue par un calcul de simulation pour lequel on a supposé une séquence de trois jours pendant lesquels la température intérieure du local abritant la vitrine fluctue de manière sinusoïdale de $\pm 2,5$ °C autour d'une moyenne de 20 °C.

Le calcul montre que dans ces conditions l'humidité relative dans le local varie de ± 8 % autour de la moyenne de 50 %. Dans le même temps, l'humidité relative dans la vitrine connaît une évolution sensiblement plus modérée puisque les fluctuations sont de l'ordre de $\pm 0,6$ % autour de la même moyenne.

¹³¹ Le raisonnement qui va suivre peut s'appliquer à des situations semblables impliquant d'autres matériaux hygrosopiques que le papier.

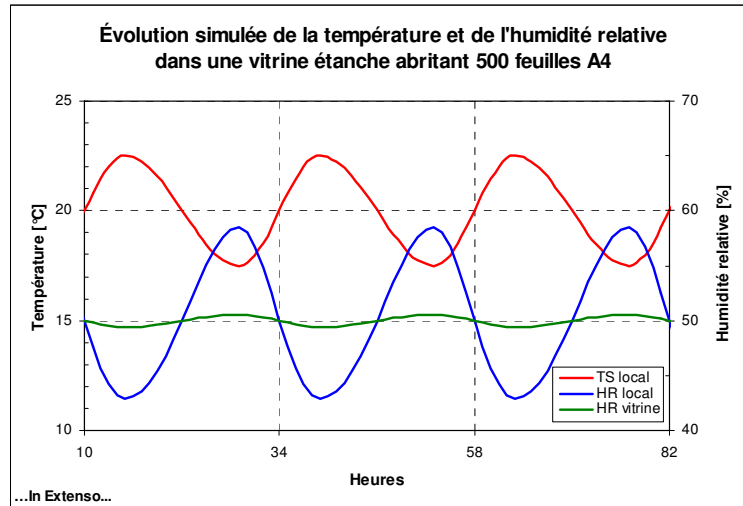


Figure 31 – Évolution de la température et de l'humidité relative dans une vitrine étanche abritant une ramette de 500 feuilles A4.

La liasse de papier a bien joué un rôle tampon évident en réduisant la fluctuation attendue de l'humidité relative. Cet exemple est aisé à transposer à la situation d'un magasin d'archives. Si son étanchéité à l'air vis-à-vis de l'extérieur est suffisante, il jouera le rôle de la vitrine tandis que les collections représenteront celui de la ramette de papier. Dans l'exemple traité, le ration masse de papier sur volume d'air est seulement de $2,5 \text{ kg/m}^3$. Dans un magasin standard d'archives, il atteint 160 kg/m^3 ! Constituant un formidable réservoir de vapeur d'eau, les documents abrités dans les magasins amortiront les variations de l'humidité relative de l'air à chaque fois que des fluctuations de la température se produiront.

Comparaison d'une sollicitation climatique et de la réponse d'un bâtiment

Pour bien comprendre les phénomènes responsables des échanges thermiques et hydriques entre un bâtiment et son environnement, il convient de s'appuyer préalablement sur l'analyse des sollicitations climatiques extérieures. Ainsi que cela a été expliqué au chapitre 3 (page 41), les incertitudes du climat n'ont rien d'aléatoire. Dans une large mesure, elles sont le résultat de phénomènes périodiques complexes (telle que l'alternance des jours et des nuits) qui déterminent des fluctuations d'amplitudes et de fréquences variables. Cette réalité physique justifie qu'on puisse regarder l'évolution d'un paramètre climatique tel que la température sèche (\rightarrow LEXIQUE) de l'air extérieur comme un signal comportant une superposition d'ondes de fréquences¹³² distinctes.

Pour analyser de tels signaux, il existe des outils mathématiques puissants parmi lesquels la *transformée de Fourier*¹³³ occupe une place prépondérante¹³⁴. Particulièrement adaptée à l'examen des signaux *stationnaires*¹³⁵, la transformée de Fourier permet d'identifier

¹³² La *fréquence* exprime le nombre de cycles d'une onde par unité de temps. Sa dimension est donc l'inverse d'un temps. Elle est le plus souvent notée f . Une unité spéciale, le hertz (Hz), lui a été attribuée. La *période* d'une onde, T , se définit simplement comme la durée d'un cycle (écart de temps entre deux valeurs identiques de l'onde périodique). C'est l'exact inverse de la fréquence. On a la relation : $f = 1 / T$.

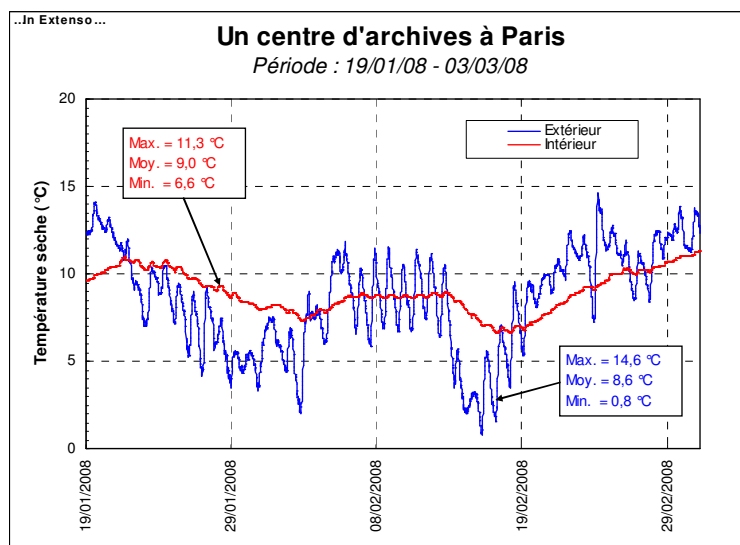
¹³³ C'est dans son célèbre et magistral traité *Théorie analytique de la chaleur* publié chez Firmin Didot à Paris en 1822, que le mathématicien Joseph Fourier a, le premier, développé cette technique d'analyse harmonique qui porte aujourd'hui fort légitimement son nom.

¹³⁴ Parmi une très abondante littérature sur ce thème, on peut consulter un ouvrage très complet encore d'actualité : J. MAX. – *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*, tome 1, Masson, Paris, 1989. Un ouvrage plus récent mérite d'être cité : K. KPALMA, V. HAESE-COAT. – *Traitement numérique du signal – Théorie et applications*, Ellipses, Paris, 2003.

¹³⁵ Stationnaire ne veut pas dire constant ! Un signal est dit *stationnaire* lorsque ses propriétés fondamentales (son spectre fréquentiel par exemple) ne changent pas au cours du temps. Une onde sinusoïdale est l'exemple parfait d'un signal stationnaire. Elle varie en permanence mais ses propriétés fondamentales (sa fréquence et son amplitude) ne changent pas. Une image concrète d'un tel signal est le courant électrique alternatif dont la fréquence (50 Hz en France) et l'amplitude (représentée par la tension utile exprimée en volts) demeurent constantes. Lorsque le signal est *instationnaire* (c'est le cas notamment lorsque son spectre fréquentiel est modifié au cours du temps), la transformée de Fourier est moins adaptée. D'autres méthodes existent telles

le spectre des fréquences formant l'infrastructure du signal. Par analogie avec les spectromètres de masse capables de déterminer la composition chimique d'un échantillon de matière, la transformée de Fourier pourrait être qualifiée de spectromètre numérique apte à déterminer le contenu en fréquences des signaux étudiés.

L'exemple traité dans cette annexe reprend le cas cité au chapitre 3 et qu'illustre la **Figure 11** (p. 47) reproduite ici pour une référence plus commode.



On se propose de comparer le contenu fréquentiel d'une part de la série de données représentant la température extérieure (tracée en bleu sur la figure) et, d'autre part, celui de la série relative à la température intérieure (tracée en rouge).

L'algorithme de calcul¹³⁶ utilisé pour cette analyse est une version adaptée à la nature *discrète*¹³⁷ des signaux traités. Le résultat pour la température extérieure est donné par la

que les techniques d'analyses en ondelettes. Pour en savoir plus sur les fondements de ces nouvelles approches du traitement du signal, on peut consulter l'ouvrage rédigé par l'un des meilleurs spécialistes français de la question : Y. MEYER. – *Les ondelettes – Algorithmes et applications*, Armand Colin, Paris, 1994.

¹³⁶ Il est désigné par son acronyme FFT pour *Fast Fourier Transform* (« Transformée de Fourier rapide »).

¹³⁷ Les paramètres climatiques (température, humidité relative) sont par nature des phénomènes continus. Compte tenu de la nécessité de stocker numériquement les informations collectées, la mesure des paramètres est généralement assurée par des dispositifs électroniques qui réalisent une acquisition échantillonnée. En d'autres termes, les mesures sont faites à un certain intervalle de temps appelé *pas d'échantillonnage*. Ce sur quoi porte l'analyse ultérieure est donc un *signal discrétisé*, c'est-à-dire une suite de nombres indépendants représentant les mesures successives réalisées par le système d'acquisition.

Figure 32. Il convient de négliger les premières valeurs élevées situées à l'extrême gauche du spectre. Elles correspondent à des artefacts du calcul. En revanche, les pics pointés par les légendes représentent les informations les plus significatives. Les *fréquences* correspondantes ont été traduites en *périodes*, grandeurs d'interprétation plus facile.

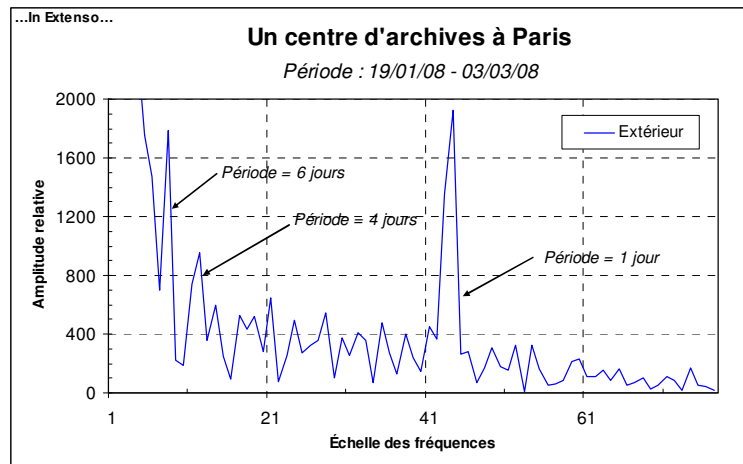


Figure 32 – Spectre fréquentiel de la température extérieure.

Trois fréquences dominent. La plus significative est celle qui correspond à une période d'une journée. L'analyse du signal permet de retrouver une caractéristique permanente de l'onde de température extérieure, à savoir sa fluctuation quotidienne particulièrement marquée sur le graphe de la **Figure 11** reproduit sur la page précédente. Bien que moins évidentes à identifier, deux fréquences correspondant aux périodes respectivement de 4 et 6 jours sont à noter.

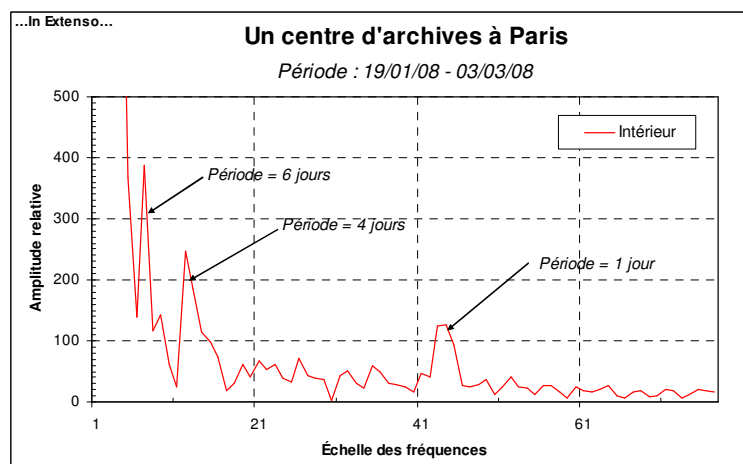


Figure 33 – Spectre fréquentiel de la température intérieure.

La **Figure 33** met en évidence la réelle parenté fréquentielle de la température extérieure et de la température intérieure, un phénomène a priori insoupçonnable au seul examen de la **Figure 11**. Les fréquences dominantes sont les mêmes. Un autre phénomène est mis en évidence. Si les fréquences associées aux périodes de 4 et 6 jours ont une amplitude relative semblable sur les deux figures, il n'en va pas de même pour la fréquence associée à la période quotidienne. Elle est certes présente dans cette dernière figure mais elle connaît quelques difficultés pour émerger au dessus du « bruit spectral » provoqué par l'échantillonnage numérique du signal. Cette réduction spectaculaire de l'amplitude relative de la fréquence liée aux cycles journaliers est la signature spécifique du rôle de *filtre passe-bas* joué par l'enveloppe du bâtiment à l'égard de la sollicitation extérieure. Ainsi que l'analyse du spectre fréquentiel des signaux le démontre de manière irréfutable, le bâtiment est « transparent » aux basses fréquences, c'est-à-dire aux fluctuations caractérisées par des périodes longues, tandis qu'il apparaît pour l'essentiel « opaque » aux fluctuations de hautes fréquences et notamment à celles correspondant à un cycle quotidien.

Qu'il s'agisse d'un château médiéval aux lourdes maçonneries ou d'une construction légère à structure métallique plus ou moins bien isolée, tout bâtiment amortit l'onde climatique extérieure mais, bien entendu, à des degrés divers qui dépendent de sa morphologie architecturale, de son taux d'ouverture vitrée et de la nature des matériaux qui le constituent. Les choix de conception lors des opérations de construction ou de réhabilitation auront, par conséquent, un impact direct sur le comportement intérieur des locaux en les rendant plus ou moins sensibles aux variations climatiques extérieures. Les premières conditions pour assurer une grande stabilité des paramètres thermohygro-métriques des ambiances, au niveau de ce qui est exigé pour une bonne conservation à long terme des fonds et collections d'archives, portent donc sur l'agencement des espaces et la structure ainsi que la nature de leur enveloppe.

Conditions climatiques recommandées par la norme ISO 11799:2003

Type de matériaux	Température [°C]			Humidité relative [%]		
	Minimum	Maximum	Changements admissibles quotidiennement à l'intérieur des limites	Minimum	Maximum	Changements admissibles quotidiennement à l'intérieur des limites
Papier, pour une conservation optimale	2	18	± 1	30	45	± 3
Papier, dans les zones fréquentées par du personnel, pour des documents consultés régulièrement	14	18	± 1	35	50	± 3
Parchemin, cuir	2	18	± 1	50	60	± 3
Film photographique : gélantino-argentique noir et blanc sur support en acétate de cellulose :						
- soit		2	± 2	20	50	± 5
- ou		5	± 2	20	40	± 5
- ou		7	± 2	20	30	± 5
Film photographique: ou gélantino-argentique noir et blanc ou blanchiment couleurs-argent («Silver dye bleach») sur support en polyester		21	± 2	20	50	± 5
Film photographique: couleurs (chromogène) sur support en acétate de cellulose :						
- soit		- 10	± 2	20	50	± 5
- ou		- 3	± 2	20	40	± 5
- ou		2	± 2	20	30	± 5
Plaque photographique : gélantino-argentique noir et blanc		18	± 2	30	40	± 5
Tirage photographique sur papier : ou gélantino-argentique noir et blanc ou blanchiment couleurs-argent («Silver dye bleach») ou diazoïque		18	± 2	30	50	± 5
Tirage photographique sur papier: couleurs (chromogène)		2	± 2	30	40	± 5
Tirage photographique sur papier : tous les autres types		- 3	± 2	30	50	± 5
Microfilm: gélantino-argentique noir et blanc sur support en acétate de cellulose						
- soit		2	± 2	20	50	± 5
- ou		5	± 2	20	40	± 5
- ou		7	± 2	20	30	± 5
Microfilm : ou gélantino-argentique noir et blanc sur support en polyester ou argentique thermique sur		21	± 2	20	50	± 5

support en polyester ou vésiculaire sur support en polyester						
Disque gramophone (acétate, shellac, vinyle)	16	20	± 2	30	40	± 5
Bande magnétique (électronique, audio, vidéo) sur support en polyester	8	11	± 2	15	50	± 5
- soit	8	17	± 2	15	30	± 5
- ou	8	23	± 2	15	20	± 5
Bande magnétique (autres types)	12	18	± 2	30	40	± 3
Disque optique	- 10	23	Aucune donnée actuellement disponible	20	50	± 10

Tableau 4 – Extrait de l'annexe B (informative) de la norme ISO 11799:2003.

Remarque : on observera que les « changements admissibles quotidiennement » figurant dans le tableau sont exprimés sous forme d'une tolérance de variation. Ainsi, quand la norme propose une tolérance de ± 2 °C, cela correspond à une amplitude des fluctuations journalières acceptées de 4 °C.

Exemple de protocole de réception des conditions climatiques dans un magasin de conservation d'archives

Les indications qui suivent sont communiquées à titre d'exemple. Elles doivent constituer non un texte intangible à transcrire directement dans le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) d'un marché de consultation d'entreprises, mais plutôt une invitation à la réflexion sur un sujet complexe.

Un certain nombre de précisions doivent être préalablement apportées.

Distinction entre incertitudes de mesure et tolérances de variation

Lorsqu'un objectif de température ou d'humidité relative doit être exprimé, il convient de distinguer deux notions trop souvent confondues : l'*incertitude de mesure* et la *tolérance de variation*.

L'incertitude de mesure est un critère métrologique. Il s'attache à qualifier la capacité d'un appareil de mesure à donner une valeur mesurée proche d'une valeur connue dans un processus d'étalonnage. Ainsi, une indication telle que : « $\pm 4\%$ HR sur la plage 10 à 90 % HR » relevée dans la documentation d'un constructeur de sondes de mesure de l'humidité relative indique très clairement que la mesure réalisée avec ladite sonde est connue avec une incertitude de $\pm 4\%$. En d'autres termes, si la sonde affiche une valeur mesurée de 50 %, cela signifie que la « vraie » valeur se trouve dans la plage 46 % – 54 % avec une très grande probabilité.

La *tolérance de variation* est un concept qui relève non de la mesure proprement dite mais des objectifs de contrôle climatique souhaités par l'utilisateur. Fixer par exemple un objectif de régulation de l'humidité relative à 50 % $\pm 5\%$ signifie que l'utilisateur souhaite que ce paramètre climatique demeure dans la plage 45 % - 55 %, à l'incertitude de mesure près ! Si l'incertitude de mesure est par ailleurs de $\pm 3\%$, cela signifie que la variation effective de l'humidité relative pourra être comprise entre 42 % et 58 %. L'indication « $\pm 5\%$ » mentionnée plus haut en tant que tolérance de variation renvoie donc cette fois-ci non à l'incertitude de la mesure mais à la tolérance acceptée pour la variation du paramètre considéré, sachant que l'information obtenue in fine sera entachée d'une incertitude liée à l'imperfection de toute mesure.

Pour éviter cette ambiguïté de notation, il est souhaitable d'exprimer la tolérance de variation sous forme d'une limite supérieure à l'*amplitude de fluctuation* du paramètre concerné. Prenons un exemple tiré de la norme ISO 11799:2003 (voir page 139). Pour la conservation optimale du papier, ses recommandations sont : « plage de température 2 °C – 18 °C, avec un changement quotidien admissible de ± 1 °C ». Il serait plus judicieux d'exprimer la tolérance de variation ainsi : « amplitude maximale des fluctuations quotidiennes : 2 °C. » Cette écriture est strictement équivalente à la précédente mais évite toute confusion avec la notion d'incertitude de mesure.

Dans son cahier des charges, le maître d'œuvre doit donc définir distinctement l'incertitude de mesure qu'il souhaite ainsi que la tolérance de fluctuation exprimée sous forme d'une amplitude maximale acceptée par l'utilisateur.

Par ailleurs, fixer une tolérance de variation sans autre précision est objectivement insuffisant. Il est indispensable d'indiquer sur quelle(s) échelle(s) temporelle(s) cette variation peut se produire. Du point de vue de la conservation, ce n'est pas du tout la même chose d'accepter une amplitude de fluctuation de 5 % sur une journée ou sur une année.

Normalement, *incertitude de mesure* et *tolérance de variation* (sous la forme d'une amplitude de fluctuation) ne devraient pas être confondues puisqu'elles doivent être stipulées à des emplacements distincts dans le CCTP. Les tolérances de variation doivent être mentionnées dans les objectifs climatiques à atteindre tels qu'ils ont été fixés par le programme de construction, tandis que l'incertitude de mesure est une spécification technologique qui relève normalement des choix de la maîtrise d'œuvre et doit à ce titre être décrite dans un paragraphe spécial.

Objectifs des contrôles et moyens requis

Entre autres performances des équipements techniques, le protocole de réception doit permettre de vérifier que le fonctionnement des installations se traduit par le respect des valeurs cibles choisies pour la température et l'humidité relative en intégrant les amplitudes de fluctuation aux différentes échelles temporelles concernées. Sur ce point particulier, les essais COPREC¹³⁸ ne permettent pas la vérification souhaitée.

¹³⁸ Voir note 121.

Idéalement, cette vérification suppose un temps d'observation des installations fonctionnant à plein régime pendant une durée au moins égale à l'échelle temporelle la plus grande choisie pour les limites des amplitudes de variation. Ainsi, si une amplitude de variation annuelle est imposée, il conviendrait que le contrôle porte sur une durée d'un an. Cette mesure sera inapplicable la plupart du temps. Une durée intermédiaire peut être proposée consistant à utiliser la période de purge du bâtiment (voir le paragraphe « Chapitre 5 », page 109) longue la plupart du temps de trois mois pour exercer ce contrôle de réception. L'amplitude annuelle de variation sera alors ajustée au prorata de la durée effective du contrôle. Si la durée du contrôle est réduite à trois mois, on divisera l'amplitude annuelle de variation par quatre.

Pratiquement, comment réaliser le contrôle ? Un simple relevé opéré manuellement sur une base journalière est totalement impraticable. Ce contrôle devant porter sur tous les magasins ainsi que dans un certain nombre de locaux associés, et devant permettre de vérifier notamment l'amplitude des fluctuations quotidiennes, le contrôle doit impérativement être automatisé.

Le dispositif de pilotage et de surveillance des installations techniques (GTB) peut éventuellement être utilisé mais plusieurs conditions doivent être réunies :

- il doit exister au moins une sonde de qualité métrologique suffisante capable de mesurer la température et l'humidité relative placée dans chaque local à contrôler et placée à proximité des collections ; les sondes placées sur un mur extérieur, à proximité d'une ouverture vitrée ou d'une porte ne conviennent pas ;
- les données transmises à la GTB doivent pouvoir être enregistrées avec un pas de temps de 15 mn ou moins ;
- les mesures enregistrées doivent pouvoir être récupérées sous un format « texte » ou EXCEL[®] afin d'être analysées dans une application extérieure à la GTB ;
- un enregistrement sans interruption des données doit être garanti ; il suppose d'une part que le logiciel de GTB ait été correctement paramétré et, d'autre part, que l'alimentation électrique du système soit secourue.

Si les conditions ci-dessus ne sont pas réunies, il conviendra d'utiliser le système d'information climatique indépendant de la GTB qui aura été préalablement mis en place dans les magasins selon les recommandations figurant dans le paragraphe « Le suivi du climat : une responsabilité du conservateur » (page 120). Le système de mesure choisi pour le contrôle de réception devra être impérativement mentionné dans le CCTP pour éviter toute contestation le moment venu.

Procédure de contrôle

La procédure de contrôle va consister à vérifier pour chaque magasin ou local concerné qu'un certain nombre de critères sont satisfaits. *In fine*, une analyse des résultats globaux permettra de conclure sur la recevabilité des installations.

- ***Critère de respect des valeurs-cibles***

Les valeurs-cibles de la température et de l'humidité relative, assorties des amplitudes de fluctuation à long terme, peuvent être représentées de manière synthétique sur un diagramme de l'air humide à l'image de la **Figure 6** (page 38). On rappelle que les mesures doivent permettre de vérifier que la température *et* l'humidité relative observées dans les locaux de conservation respectent *simultanément* les plages qui leur sont respectivement imposées. Cette vérification ne peut être réalisée pratiquement qu'à l'aide d'une analyse statistique conduisant à déterminer le pourcentage de conformité des mesures aux objectifs. Idéalement, le score obtenu doit être de 100 %. Il conviendra de fixer dans le CCTP la valeur seuil en deçà de laquelle la série de mesures sera considérée comme non-conforme. Un seuil de 95 % peut être considéré comme une valeur de référence.

- ***Critère de respect des amplitudes de fluctuation à l'échelle quotidienne***

La vérification du respect des amplitudes de fluctuation à court terme et notamment à l'échelle quotidienne, nécessite également des calculs statistiques. Le principe du calcul consiste à définir une fenêtre temporelle dont la taille correspond à l'échelle de fluctuation pour laquelle une tolérance est fixée. Supposons, pour simplifier, que cette échelle soit égale à une journée et que l'on s'intéresse à la seule température. On doit donc examiner les premières 24 heures, déterminer le maximum de la température sur cette période, puis le minimum, calculer l'écart et le comparer à la valeur maximale acceptée pour cet écart. Puis on décale la « fenêtre temporelle » d'un pas de temps. Et ainsi de suite. Le calcul est répété pour l'humidité relative. Lorsque les calculs sont achevés, on obtient une statistique sur le

respect des fluctuations à court terme. Comme précédemment, il s'agira de préciser dans le CCTP la valeur seuil en deçà de laquelle la série de mesures sera considérée comme non-conforme.

- ***Synthèse pour le magasin étudié***

Un magasin est supposé satisfaire les exigences du contrôle sur la période considérée s'il respecte les deux critères décrits précédemment.

Définitions de quelques notions fondamentales

Les définitions proposées dans ce lexique sont rédigées de telle sorte qu'elles soient aussi autonomes que possible. Cependant, pour ne pas alourdir le texte, il a été parfois nécessaire d'utiliser des termes expliqués par ailleurs dans ce même lexique. Les termes concernés sont notés en gras et renvoient à leur définition du lexique. Les termes en italiques sont des corrélats dont la définition figure dans le paragraphe où ils apparaissent.

ACTIVITÉ EN EAU L'expression désigne l'**humidité relative** de l'environnement d'un matériau hygroscopique (→ **Hygroscopicité**) lorsque les échanges de vapeur d'eau entre le matériau et son environnement ont atteint l'équilibre. L'activité de l'eau est le plus souvent notée a_w . Tout comme la notion plus générale d'humidité relative, l'activité de l'eau est un rapport sans dimension. Si l'humidité relative est presque toujours exprimée en pourcentage (de 0 à 100 %), l'activité de l'eau est donnée par un nombre compris entre 0 et 1.

ADSORPTION Phénomène de piégeage d'une substance (en général un liquide ou un gaz) dénommée l'*adsorbat* à la surface d'une autre substance (en général solide), dénommée l'*adsorbant*. Au voisinage d'une surface, une molécule va être soumise aux *forces électrostatiques dites de Van der Waals*. Si son énergie cinétique est insuffisante, elle va être capturée par la surface. Il y a eu simple adsorption dite encore *physisorption*. C'est un processus réversible. Le phénomène inverse porte le nom de *désorption*. Si une affinité chimique existe entre le matériau et la molécule capturée, une réaction peut se produire. La molécule sera alors définitivement captive. Ce cas de figure correspond à un processus de *chimisorption* qui, lui, est irréversible. Pour un matériau donné et une substance donnée, il est possible de déterminer expérimentalement les conditions dans lesquelles le mécanisme de l'adsorption peut se produire. On établit ainsi des relations appelées *isothermes d'adsorption* propres à chaque couple matériau –

substance. La **Figure 30** (p. 131) en est un exemple pour le papier et la vapeur d'eau. L'expression « isotherme » rappelle que l'adsorption est un phénomène dépendant de la température.

CELLULOSE

Constituant principal des végétaux, la cellulose est un polymère naturel constitué d'un enchaînement de plusieurs milliers de molécules de glucose, un sucre appartenant à la grande famille des glucides. Sa formule chimique $(C_6H_{10}O_5)_n$ indique que les seuls éléments chimiques entrant dans la composition du glucose et donc de la cellulose sont le carbone, l'hydrogène et l'oxygène.

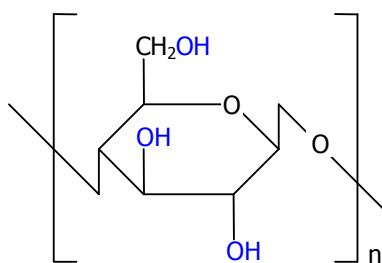


Figure 34 – Structure chimique de la cellulose mettant en évidence les trois fonctions hydroxyles greffées sur le motif principal (représentées en bleu).

La cellulose est typiquement une substance **organique**. La cellulose est insoluble dans l'eau et dans la plupart des solvants. Sa structure moléculaire linéaire favorise la formation de microfibrilles associant plusieurs chaînes cellulosiques grâce à des **liaisons hydrogène**.

CHARBON ACTIF

Utilisé principalement dans les filtres dit *moléculaires* (capables de capturer les molécules) par opposition aux filtres *particulaires* (susceptibles d'arrêter les particules). S'obtient par carbonisation de matières végétales telles que notamment la noix de coco. Un traitement complémentaire appelé *activation* est réalisé à l'aide de vapeur d'eau à haute température. Il confère au matériau une très grande porosité conduisant à une *surface spécifique* supérieure à 1000

m²/g. L'**adsorption** du charbon actif est surtout efficace sur les polluants de masse molaire supérieure à 30 g/mol et dont le point d'ébullition est supérieur à 60 °C à la pression atmosphérique. Il est possible d'imprégner le charbon actif avec des substances (iodure de potassium, hydroxyde de sodium, etc.) qui agissent par chimisorption pour conférer au médium filtrant une plus grande efficacité.

DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE Un diagramme psychrométrique est une représentation graphique des relations thermodynamiques entre toutes les propriétés physiques de l'air humide. Du point de vue étymologique, il eût été plus juste de qualifier ce diagramme d'hygrométrique (de *hugros*, « humide, mouillé ») plutôt que de psychrométrique (de *psukhros*, « froid »). Ce diagramme est parfois appelé plus simplement *diagramme de l'air humide* ou encore *abaque de Mollier* d'après Richard MOLLIER (1863-1935), professeur de Physique à l'université de Göttingen, qui a créé ce type de graphe. Les relations fondamentales que traduit le diagramme psychrométrique dépendent, pour la plupart, de la pression totale du mélange formé par l'air sec et la vapeur d'eau. C'est la raison pour laquelle on fait figurer sur chaque diagramme soit la pression atmosphérique, soit, ce qui revient au même, l'altitude de référence correspondant à la pression atmosphérique pour laquelle il a été tracé. L'entrée dans le graphe se fait avec deux grandeurs quelconques. Il suffit ensuite de lire toutes les autres grandeurs sur les échelles appropriées. Le diagramme psychrométrique est l'outil de travail de base pour toute personne qui doit appréhender les différents paramètres caractéristiques de l'air humide.

ÉNERGIE

L'énergie est une grandeur caractéristique de l'état d'un corps. Elle se manifeste sous diverses formes : calorifique, chimique, électromagnétique, électrique, mécanique, etc. L'énergie peut se transformer d'une forme en une autre mais ne peut être ni

produite¹³⁹ ni détruite. Cette affirmation peut être qualifiée de « principe », au sens d'une proposition fondatrice de la thermodynamique. Notons qu'à ce jour, elle n'a jamais été démontrée mais aussi qu'aucune expérience ne l'a jamais invalidée. Ce principe de conservation de l'énergie répond à la manière d'un écho, au principe de conservation de la masse et des éléments chimiques énoncé au XVIII^e siècle par le savant français Antoine Laurent de LAVOISIER (1743-1794). L'unité d'énergie est le joule (J), du nom célèbre physicien anglais James Prescott Joule (1818-1889).

HUMIDITÉ RELATIVE Rapport de la **pression partielle de vapeur** d'eau présente dans une enceinte de température déterminée à la *pression de vapeur saturante* qui pourrait être atteinte dans la même enceinte à cette même température. Ce rapport sans dimension s'exprime en pour cent. Le point clé à retenir est que l'humidité relative dépend tout à la fois de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'ambiance, quantité mesurée par la pression de vapeur, et de la température de l'ambiance comme le résume l'illustration suivante :

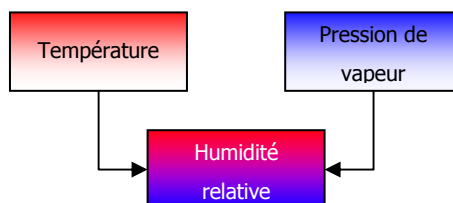


Figure 35 – L'humidité relative est une grandeur dépendante à la fois de la température et de la pression de vapeur de l'air humide.

Si la pression de vapeur demeure constante dans un local, ce qui correspond à une situation où la quantité de vapeur dans l'air ne change pas, alors, à chaque augmentation de la température correspondra une baisse de l'humidité relative et inversement.

¹³⁹ Dans le langage courant, on parle couramment de « producteurs » d'énergie. Cette dénomination est physiquement incorrecte.

L'interprétation des variations de l'humidité relative ne peut donc être conduite sans l'analyse conjointe des fluctuations de la température.

HYGROSCOPICITÉ Propriété d'un matériau capable d'adsorber et de désorber (→ **Adsorption**) de la vapeur d'eau. Pour être qualifié d'hygroscopique, un matériau devra être poreux mais cette porosité devra être *ouverte*, autrement dit, il importe que les pores communiquent entre eux. De plus, il faudra que la taille des pores ne soit pas trop grande afin que les phénomènes de capillarité puissent permettre à l'eau adsorbée de pénétrer profondément dans le matériau considéré. Parmi les matériaux présents dans les archives, nombreux sont ceux qui répondent aux conditions énoncées. On peut citer le papier, le carton, les peaux, le bois, la gélatine (un des constituants des produits photographiques), etc.

LIAISON HYDROGÈNE Les liaisons hydrogène sont des forces intermoléculaires agissant entre une substance polaire comportant au moins un atome d'hydrogène (le donneur de liaison) et une autre substance polaire (l'accepteur de liaison). Quoique pouvant être beaucoup plus intenses, les liaisons hydrogène sont de nature essentiellement électrostatiques comme les forces de Van der Waals régissant les mécanismes de l'**adsorption**. L'atome d'hydrogène ne comporte qu'un électron. Lorsque cet électron est engagé dans une liaison chimique covalente avec un autre corps, l'atome d'hydrogène présente une asymétrie de charge électrique qui lui confère une polarité positive favorisant une interaction avec des substances présentant une polarité opposée. L'eau est l'archétype de molécule polaire. Sa structure composée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène fait qu'elle peut être à la fois donneur de liaison (via les atomes d'hydrogène) et accepteur (via l'atome d'oxygène). Le couplage des liaisons hydrogène entre plusieurs molécules explique la forte cohésion de l'eau liquide.

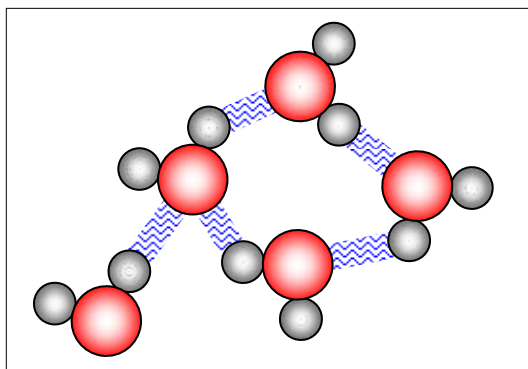


Figure 36 – Schéma des liaisons hydrogène entre molécules d'eau. Les atomes d'oxygène sont représentés en rouge tandis que les atomes d'hydrogène le sont en gris. Les liaisons hydrogène représentées en bleu, ont une longueur d'environ 2 \AA ($2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$).

ORGANIQUE

On appelle *organique* une substance contenant au moins un atome de carbone. Quelques exceptions à cette définition : deux oxydes du carbone, le monoxyde CO et le dioxyde CO₂, ainsi que les carbonates et les carbures, sont considérés comme relevant de la chimie minérale. La complexité de la chimie organique provient de l'extraordinaire variété des combinaisons que peut former le carbone avec quelques autres atomes comme l'hydrogène (H), l'oxygène (O) et l'azote (N). Le carbone est en effet un atome contenant six protons. Il dispose donc de six électrons dont quatre occupent la couche externe. Le carbone est donc en mesure d'établir jusqu'à quatre liaisons covalentes avec d'autres atomes. On compte des millions de molécules organiques dont les propriétés sont loin d'avoir été totalement explorées. Les protéines, les sucres, les graisses, les plastiques sont autant d'immenses familles de substances naturelles ou artificielles. L'autre singularité de la chimie des composés de carbone est l'existence de macromolécules, des polymères, dont la masse molaire peut atteindre des dizaines de milliers de grammes par mole. Enfin, la chimie organique est celle aussi des *organismes* vivants. Telle est du reste l'origine de l'adjectif « organique ». Aujourd'hui, l'opposition entre chimie organique et minérale n'a plus cours même si l'on a conservé cette séparation

traditionnelle tout en admettant que toutes deux obéissent aux mêmes lois physiques sous-jacentes.

PRESSIION PARTIELLE DE VAPEUR L'air est un mélange de gaz. À l'azote et à l'oxygène constituant ce qu'il est convenu d'appeler l'*air sec* dans des proportions toujours constantes, s'ajoute, en proportion variable, de l'eau à l'état de *vapeur*, nom donné à un gaz proche de son point de liquéfaction. Le mélange d'air sec et de vapeur d'eau est désigné par l'expression *air humide*. Chaque gaz présent dans le mélange exerce sa contribution, dite « pression partielle » à la pression totale en proportion du nombre de molécules qui le constitue.

PUISSANCE Se définit comme la quantité de travail délivrée par unité de temps. En prenant en compte l'équivalence entre **énergie** et travail, une autre définition peut être proposée : « énergie fournie par unité de temps ». La première définition est utile en mécanique. La seconde est plus adaptée à l'énergétique. L'unité de puissance découle directement de sa définition : c'est le joule par seconde (J/s). On lui a donné le nom de watt (W) en souvenir de James WATT (1736-1819), l'ingénieur écossais qui a considérablement perfectionné les machines à vapeur après avoir longtemps fabriqué des instruments scientifiques.

RAPPORT DE MÉLANGE L'air contient de la vapeur d'eau en quantité variable. Il existe bien des manières de caractériser le mélange d'air sec et de vapeur d'eau qu'il est convenu d'appeler « air humide » (→ **Pression partielle de vapeur**). La plus claire est sans doute la notion de *rapport de mélange*. Appelons m_v la masse de vapeur et m_a la masse d'air sec. Il est évident que m_h , la masse d'air humide, est égale à la somme $m_v + m_a$. Le rapport de mélange est un ratio qui permet de quantifier la masse de vapeur d'eau mêlée à l'air. Il est calculé en faisant le rapport de la masse de vapeur d'eau présente dans l'air humide et de la quantité d'air sec avec lequel il est mélangé. Si le rapport de mélange est noté r_m , on pourra écrire très

simplement : $r_v = m_v/m_a$. Étant égal au rapport de deux masses, le rapport de mélange, dans l'absolu, est un nombre sans dimension. Pourtant, on a pris l'habitude de l'exprimer avec une pseudo-unité, le gramme de vapeur par kilogramme d'air sec (g_v/kg_{as}) afin de rappeler son mode de calcul. Pour information, notons que cette grandeur est parfois dénommée « poids en eau » dans la littérature technique.

RÉGULATION PID

L'acronyme PID signifie « Proportionnelle-Intégrale-Dérivée ». Comme tous les dispositifs de régulation, une régulation PID détermine le réglage d'un appareil assurant le contrôle d'un paramètre physique (niveau d'un réservoir, vitesse d'une machine, température ou hygrométrie d'un local, etc.) en fonction de l'écart existant à un instant donné entre la consigne fixée pour le paramètre et la valeur observée. La particularité d'une régulation PID est de combiner simultanément trois actions : une action dite « proportionnelle », une action dite « intégrale » et une action dite « dérivée ». L'action « proportionnelle » permet d'ajuster la vitesse de réponse du système régulé à l'amplitude. Cependant, une trop grande vitesse de réponse dégrade la stabilité. Des oscillations apparaissent. Pour sa part, l'action « intégrale » vise à annuler l'écart entre la valeur observée du paramètre et la consigne. Une action trop forte risque, comme la précédente, de provoquer une instabilité du système régulé. Enfin, l'action « dérivée » joue un rôle d'anticipation des effets de la régulation en introduisant un terme tenant compte de la vitesse de variation de l'écart (d'où l'expression empruntée aux mathématiques de « dérivée ») qui limite les risques d'instabilité. Le réglage correct d'une régulation PID nécessite des procédures spécifiques d'essai permettant d'identifier le temps de réponse du système que l'on cherche à réguler. Dans le cas particulier des magasins de conservation, les inerties thermique et hydrique sont très élevées, les temps de réponse correspondants sont donc très longs. S'ils ne sont pas pris

en compte, des fluctuations importantes apparaissent comme on peut le constater fréquemment. L'installation d'une régulation sophistiquée est en soit insuffisante si elle n'est pas correctement paramétrée par un technicien averti.

TEMPÉRATURE ABSOLUE Les lois de la thermodynamique permettent de montrer qu'il existe une température en dessous de laquelle il est impossible de descendre. Cette limite physique est logiquement nommée *zéro absolu*. Elle vaut $-273,15$ °C dans l'échelle Celsius. Les physiciens utilisent une échelle de température dont l'origine est précisément ce zéro absolu. Les mesures s'y expriment en kelvins (K). Pour faciliter les conversions, la valeur d'un écart d'un kelvin a été choisie égale en amplitude à un écart d'un celsius. Il s'en suit qu'on passe d'une échelle à l'autre par une simple translation de l'origine. Ainsi, une température de 20 °C correspond à $20 + 273,15$ soit $293,15$ kelvins. À l'inverse, 300 kelvins sont l'équivalent de $300 - 273,15$ soit $26,85$ °C.

TEMPÉRATURE HUMIDE Température de l'air mesurée avec un thermomètre dont le bulbe est maintenu humide avec une eau parfaitement pure, à l'aide d'un dispositif approprié. Plus l'air sera sec, plus l'évaporation de l'eau autour du bulbe du thermomètre abaissera sa température. Un écart important entre la **température sèche** et la température humide signe une grande sécheresse de l'air. Connaissant la pression atmosphérique d'une part, et les températures sèche et humide d'un volume d'air humide mesurées avec un psychromètre d'autre part, on peut en déduire par le calcul, ou graphiquement à l'aide d'un diagramme psychrométrique, toutes les autres caractéristiques physiques du mélange.

TEMPÉRATURE DE ROSÉE C'est la température à laquelle il faut refroidir une certaine masse d'air humide pour l'amener à saturation. On utilise parfois l'expression « point de rosée ». Si, outre cette température de rosée,

on connaît la température sèche de l'air considéré, alors il est possible de déterminer toutes ses autres caractéristiques thermophysiques : rapport de mélange, enthalpie, température humide, masse volumique, etc. Nommons θ_r , la température de rosée, θ_h , la température humide et θ_s , la température sèche. Quelles que soient les caractéristiques d'un mélange « air sec » plus « vapeur d'eau », la relation suivante sera toujours vérifiée :

$$\theta_r \leq \theta_h \leq \theta_s.$$

Dans le cas où le mélange est à saturation, la relation devient :

$$\theta_r = \theta_h = \theta_s.$$

TEMPÉRATURE SÈCHE L'expression désigne la température de l'air mesurée avec un thermomètre à bulbe sec (exemple typique : le thermomètre à mercure ou à alcool). Par extension, température mesurée par tout dispositif thermométrique « sec » tels les thermographe à tambour munis d'un bilame métallique ou bien les thermomètres à résistance platine ou à thermistor inclus dans les enregistreurs numériques. Lorsqu'on parle de température d'air, sans autre précision, il s'agit toujours de la température sèche. Elle s'oppose à la **température humide**.

Principales références bibliographiques

- [ARNOULT, 1998] ARNOULT (J.-M.), coord. – « Protection et mise en valeur du patrimoine des bibliothèques – Recommandations techniques¹⁴⁰ », Direction du livre et de la lecture, Paris, 1998.
- [BUCHMANN, 1999] BUCHMANN (W.). – “Preservation: buildings and equipment”, *Journal of the Society of Archivists*, vol. 20, n° 1, 1999, pp. 6-23.
- [CHARDOT, 1989] CHARDOT (P.). – *Le contrôle climatique dans les bibliothèques*, Sedit, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, 1989.
- [COLL., 1998] COLLECTIF. – « La climatologie dans les archives et les bibliothèques », *Actes des Troisièmes Journées sur la Conservation Préventive*, Arles, 2-3 décembre 1998, Centre de Conservation du Livre.
- [CHRISTOFFERSEN, 1995] CHRISTOFFERSEN (L.). – *Zephyr Passive Climate Controlled Repositories*, Department of Buildings Physics, Lund University, Sweden, juin 1995.
- [DAF, 2009] DIRECTION DES ARCHIVES DE FRANCE. – *Règles de base pour la construction et l'aménagement d'un bâtiment d'archives¹⁴¹*, 3^e révision, octobre 2009.
- [DUCHEIN, 1985] DUCHEIN (M.). – *Les bâtiments d'archives – Construction et équipements*, Archives nationales, Paris, 1985.
- [FLIEDER, 1999] FLIEDER (F.), CAPDEROU (C.). – *Sauvegarde des collections du Patrimoine – La lutte contre les détériorations biologiques*, CNRS Éditions, Paris, 1999.
- [GIOVANNINI, 1999] GIOVANNINI (A.). – *De Tutela Librorum*, 2^e édition, IES Éditions, Genève, 1999.
- [LULL, 1995] LULL (W. P.). – *Lignes directrices concernant les conditions de conservation ambiantes dans une bibliothèque et dans un dépôt d'archives*, Conseil canadien des archives, Ottawa, 1995.

¹⁴⁰ http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/preventi/documents/conservation_dll.pdf.

¹⁴¹ <http://www.archivesdefrance.culture.gouv.fr/static/3281>.

- [ROQUEBERT, 2002] ROQUEBERT (M.-F.), coord. – *Les contaminants biologiques des biens culturels*, Elsevier, 2002.
- [SEBERA, 1994] SEBERA (D. K.). – “Isoperms – An Environmental Management Tool”, The Commission on Preservation and Access, 1994.
- [WÄCHTER, 1989] WÄCHTER (W.). – *Les techniques de conservation de masse des ouvrages de bibliothèque et des archives*, UNESCO, Paris, 1989.

Remerciements

L'auteur tient à remercier la Direction des Archives de France qui a bien voulu lui confier la réalisation de cet ouvrage. Ces remerciements s'adressent tout particulièrement à Françoise BANAT-BERGER, chef du DITN, France SAIE-BELAISCH et Marie Dominique PARCHAS qui, toutes les trois, ont assumé la charge et les responsabilités du comité de lecture.

L'auteur ne peut oublier ni la contribution précieuse de Pascale VERDIER, directrice des Archives du Bas-Rhin, ni les commentaires toujours pertinents d'Éléonore KISSEL, sa fidèle partenaire au sein d'IN EXTENSO.

L'auteur

Pierre DIAZ PEDREGAL, docteur en physique, est directeur scientifique d'IN EXTENSO, agence d'étude et de conseil, spécialisée dans la conservation préventive des biens culturels.

L'auteur serait heureux de recevoir toutes critiques, remarques, commentaires et suggestions à propos de cet ouvrage. Il peut être contacté à l'adresse électronique suivante :

pierre.pedregal@conservationpreventive.com