

Traitement de l'air dans les bâtiments d'archives

Conception et gestion des équipements



Traitement de l'air dans les bâtiments d'archives

Conception et gestion
des équipements

Alain Soret

Avec la collaboration de Noëlle Balley, Bruno Bonandrini, François Boyer, Isabelle Colson, Marc Germain, Thi-Phuong Nguyen, Marie-Dominique Parchas, Stéphanie Roussel, France Saïe-Belaïsch, Claire Sibille-de Grimouärd, Hélène Zettel

Avant-propos	5
Introduction	7
Chapitre 1. Les contraintes climatiques dans un bâtiment d'archives	11
1.1 Le comportement hygrothermique du papier	12
1.1.1 Teneur en eau et humidité relative d'équilibre (HRE)	12
1.1.2 Liens entre la teneur en eau des documents et celle de l'air environnant	13
1.2 Les conditions de conservation dans les magasins d'archives (T, HR, et poids d'eau)	15
1.2.1 Quelle température adopter dans les magasins ?	15
1.2.2 Quelle humidité relative adopter dans les magasins ?	16
1.2.3 Poids d'eau – valeur recommandée	16
1.2.4 Les conditions climatiques à adopter dans les magasins de conservation	17
1.2.5 Les conditions climatiques extérieures (bases de calcul)	17
1.3 La ventilation, le renouvellement d'air et la filtration dans un magasin d'archives	18
1.3.1 Le renouvellement d'air d'un magasin	18
1.3.2 La ventilation et le brassage d'air	19
1.3.3 La diffusion de l'air	19
1.3.4 La filtration de l'air	21
1.4 Conditions climatiques et aménagement des magasins spéciaux et locaux spécifiques	22
1.4.1 Les magasins spéciaux	22
1.4.2 Les locaux de traitement des documents	25
1.4.3 Les ateliers	27
1.5 Les locaux accessibles au public	29
1.5.1 La salle de lecture	29
1.5.2 La salle d'exposition	30
1.5.3 La salle de conférences	32
1.6 Le déménagement des documents	33
1.7 Quelle puissance de déshumidification doit-on adopter ?	36

Chapitre 2. Aide à la conception climatique du projet architectural	39
2.1 Inertie climatique, notions fondamentales	40
2.1.1 L'inertie thermique	40
2.1.2 L'inertie hydrique	42
2.1.3 L'isolation thermique	42
2.1.4 Compacité des constructions	43
2.2 La construction et l'enveloppe du bâti	43
2.2.1 Comment améliorer l'inertie climatique ?	44
2.2.2 L'étanchéité des bâtiments	48
2.3 Quelques principes de répartition des espaces	48
2.3.1 L'aménagement de couloirs autour des magasins	48
2.3.2 Les magasins enterrés	49
2.3.3 Pour les locaux techniques de traitement d'air	50
2.4 Les réglementations thermiques	50
2.4.1 La réglementation thermique RT 2012	51
2.4.2 Le diagnostic de performance énergétique (DPE)	52
2.4.3 Les simulations thermiques dynamiques (STD)	53
2.4.4 Les bâtiments d'archives face aux réglementations thermiques	54
Chapitre 3. Gestion et maintenance des bâtiments d'archives	57
3.1 Les niveaux de maintenance	58
3.2 Le contexte des professionnels du génie climatique	59
3.3 Les marches et les contrats de maintenance	60
3.3.1 La maintenance préventive	60
3.3.2 La maintenance corrective ou curative	61
3.3.3 Le gros entretien renouvellement (GER)	61
3.3.4 La gestion des dépannages et des pièces détachées	61
3.3.5 Les différents types de contrat	62

3.4 Le suivi du climat dans les magasins	63	5.3 Archives du département du Rhône et de la métropole de Lyon	102
3.4.1 La collaboration entre les responsables des collections et les techniciens de maintenance	63	5.3.1 Présentation du projet	102
3.4.2 Les capteurs enregistreurs de température et d'HR	64	5.3.2 Le projet en quelques chiffres	103
3.4.3 L'analyse des enregistrements	65	5.3.3 Description de l'enveloppe du bâtiment et de son zonage	103
3.5 La gestion technique de bâtiment (GTB)	66	5.3.4 Description technique des installations CVC	104
3.6 Les stratégies de conduite des installations en cas d'infestation	67	5.3.5 Les consommations d'énergie	114
		5.3.6 Commentaires	114

Chapitre 4. Systèmes de régulation du climat, quelques conseils pratiques 69

4.1 Gestion de l'hygrométrie	70
4.1.1 La production de froid	70
4.1.2 Le réchauffage en été	70
4.1.3 Les déshumidificateurs a adsorption	71
4.1.4 Déshumidificateurs autonomes	72
4.2 Gestion de la température	73
4.2.1 Pompes a chaleur (PAC)	73
4.2.2 Le puits canadien (ou puits provençal)	74
4.2.3 Le chauffage solaire	75
4.2.4 Le chauffage ou le rafraîchissement par le sol	75

Chapitre 5. Étude de projets récents 77

5.1 Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine	78
5.1.1 Présentation du projet	78
5.1.2 Le projet en quelques chiffres	79
5.1.3 Description de l'enveloppe du bâtiment	79
5.1.4 Description technique du traitement d'air	80
5.1.5 Les conditions climatiques des magasins	85
5.1.6 Les consommations d'énergie	88
5.1.7 Commentaires	89
5.2 Archives départementales des Yvelines à Montigny-le-Bretonneux	91
5.2.1 Présentation du projet	91
5.2.2 Le projet en quelques chiffres	92
5.2.3 Description de l'enveloppe du bâtiment et de son zonage	92
5.2.4 Description technique du traitement de l'air	94
5.2.5 Les conditions climatiques des magasins	98
5.2.6 Les consommations d'énergie	100
5.2.7 Commentaires	100

5.4 Annexe des Archives départementales de la Marne à Reims	117
5.4.1 Présentation du projet	117
5.4.2 Le projet en quelques chiffres	118
5.4.3 Description de l'enveloppe du bâtiment	118
5.4.4 Description technique du traitement de l'air	119
5.4.5 Les conditions climatiques des magasins	120
5.4.6 Les consommations d'énergie	122
5.4.7 Commentaire	122
5.5 Les Archives départementales du Nord à Lille	124
5.5.1 Présentation du projet	124
5.5.2 Le projet en quelques chiffres	126
5.5.3 Description de l'enveloppe du bâtiment	126
5.5.4 Description technique des installations du nouveau bâtiment	127
5.5.5 Les conditions climatiques des magasins	132
5.5.6 Les consommations d'énergie	134
5.5.7 Commentaires	135

Chapitre 6. Synthèse comparative des projets 137

6.1 Comparaison des enveloppes des bâtiments abritant les magasins	138
6.2 Conditions climatiques des magasins	138
6.3 Équipements de traitement d'air	140
6.4 Synthèse des consommations d'énergie	143
6.5 Maintenance	144

Annexes 149

I. Glossaire - Définitions	149
II. Les conditions de déménagement des documents	155

Avant-propos

« La critique est aisée mais l'art est difficile ». S'il est un domaine, dans la conception d'un bâtiment d'archives, auquel on peut appliquer cette phrase du comédien et auteur dramatique Philippe Nericault dit Destouches¹, c'est bien celui de la conception des équipements de traitement climatique de ces bâtiments.

La construction d'importants édifices pour la conservation de nos archives historiques et administratives s'est poursuivie sans discontinuer sur l'ensemble du territoire depuis les années 1950. L'évolution de l'architecture des bâtiments d'archives se reflète dans les termes qui les ont définis au cours du temps. Les expressions « tours des Archives » au Moyen Âge comme dans les années 1960, « palais de la Mémoire » puis maintenant « coffres précieux de la mémoire » ainsi que Maximiliano Fuksas a qualifié les Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine, ont été employées successivement. Si les architectes maîtrisent parfaitement les différents concepts à mettre en œuvre pour assurer la fonctionnalité d'un bâtiment d'archives de qualité, la question de la conception des installations climatiques semble toutefois bien plus délicate tant ces édifices sont uniques en leur genre.

Le rare qualificatif coruscant, du latin *coruscare* - briller, peut ici sortir de son oubli puisqu'il qualifie parfaitement plusieurs bâtiments d'archives édifiés récemment – totalement enveloppés de résilles ou de vêtements métalliques toutes également brillantes, étincelantes, insolites, en résumé : coruscantes.

Maints exemples contemporains de ce style peuvent être cités : les Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine, les Archives du département du Rhône et de la métropole de Lyon ou le bâtiment annexe des Archives de la Marne à Reims, décrits dans cet ouvrage ainsi que le bâtiment de conservation des Archives départementales du Nord. Il en est de même de l'annexe des Archives départementales de la Somme² à Dury qui complète le site historique conservé, dans l'ancien couvent des religieuses de la Visitation à Amiens. Mais d'autres formes d'architecture sont également possibles comme, par exemple, celle imaginée récemment pour les Archives départementales de la Guyane³ avec un habillage en bois faisant référence aux carbetaux traditionnels locaux. Tous ces revêtements, en métal, en bois ou en brique⁴, dissimulent des murs isolés et épais devenus indispensables, comme cette publication le démontre.

1 1680 – 1754, dans le Glorieux en 1732.

2 Travaux 2015 et 2016, Denu et Paradon – architectes.

3 Centre de la Mémoire de Rémire-Montjoly à Cayenne, avec des réserves des musées, en chantier en 2016 – d3 architectes.

4 Voir aussi les archives départementales de Meurthe-et-Moselle dans une ancienne école normale réhabilitée et agrandie, travaux de 2013 à 2016 - Daniel Rubin - architecte.

Cet ouvrage a été pensé en priorité comme une aide à la conception des bâtiments d'archives départementaux et de leurs équipements de traitement d'air, lors de la rédaction des programmes et des cahiers des charges. En effet, si les services techniques connaissent parfaitement bien la problématique de construction de collèges, il n'en est pas de même de celle des services d'archives, beaucoup moins répandus. Exerçant le suivi des projets de construction dans le réseau des services publics d'archives, les Archives de France sont donc en mesure, avec ce manuel, de faire partager leurs connaissances et les retours d'expérience du terrain pour le bénéfice de tous sur ce sujet particulièrement complexe.

A la lecture des enquêtes annuelles du réseau des Archives de France, il ressort, qu'en moyenne, un service d'Archives départementales d'une surface de 8 000 m², comporte plus de 5 500 m² d'espaces de conservation (environ 70 % de sa surface) et offre une capacité de conservation de 32 kml de documents. Ces chiffres démontrent l'enjeu de la question climatique, dans la mesure où les conditions de température et d'hygrométrie sont des facteurs primordiaux pour la conservation à long terme de nos collections.

Cependant, ce manuel peut également aider à la réflexion pour la construction ou l'aménagement de services d'archives de moindre taille, même si les solutions proposées ne sont pas toutes transposables, tant les questions d'économie d'énergie sont centrales dans le contexte actuel du développement durable, intégrant pour chaque projet la notion de coût global. Par ailleurs, et pour toute construction, après la mise en fonction des équipements de traitement climatique, l'importance de leur maintenance est soulignée ici.

Cet ouvrage a été rédigé par Alain Soret, ingénieur issu des musées, néanmoins acquis à la cause des archives, avec la participation d'autres spécialistes de la conservation du patrimoine écrit ou muséal qu'il convient ici de remercier chaleureusement. Nous souhaitons qu'il puisse également servir de base de réflexion dans ces autres secteurs patrimoniaux pour lesquels la prise en compte de l'environnement climatique est aussi une donnée incontournable.

Les précédentes recommandations des Archives de France en matière de climatologie ont évolué. Elles étaient citées dans l'ouvrage de Michel Duchein *Les bâtiments d'archives, construction et équipements*, paru en 1985 et demandaient pour les documents sur papier et parchemin, une température et une humidité relative quasi-constante. L'emploi de systèmes de climatisation permanents et rigides n'est plus de mise. La question du traitement de la température et surtout de l'hygrométrie reste très complexe, il n'y a pas de solution unique, mais j'espère que cet ouvrage aidera à mettre en œuvre de bonnes solutions et permettra d'éviter des erreurs dans la conception technique de nos futurs bâtiments d'archives, coruscants ou non.

Hervé Lemoine

Conservateur général du patrimoine
Directeur, chargé des Archives de France

Introduction

Le Service interministériel des Archives de France (SIAF) a souhaité la rédaction d'un manuel pratique d'aide à la conception des équipements de traitement d'air dans les bâtiments d'archives afin d'apporter aux concepteurs et aux gestionnaires de bâtiments d'archives une meilleure compréhension des questions liées à la gestion du climat dans les magasins de conservation d'archives.

Historique des publications

Ce manuel vient ainsi compléter les différents ouvrages que les Archives de France ont réalisés dans le cadre des préconisations sur la conservation des documents dans le contexte d'un projet de construction ou de réhabilitation d'un bâtiment d'archives.

Trois monographies présentant les projets architecturaux de bâtiments d'archives de 1966 à 2012¹ sont complétées par *Les règles de base pour la construction et l'aménagement d'un bâtiment d'archives*, rédigées en 2007 puis révisées à deux reprises (2008 et 2009), qui rappellent les différentes fonctions pouvant être assurées dans un bâtiment d'archives, les contraintes liées à son fonctionnement, ainsi que le rôle assuré par le bâtiment dans la conservation des documents. Un paragraphe consacré à l'environnement climatique aborde plus particulièrement les études préalables à un transfert des fonds et des collections, les recommandations à suivre lors d'un projet, ainsi que le contrôle et la surveillance des conditions climatiques d'un magasin.

Le Petit manuel de climatologie appliquée à la conception des bâtiments d'archives, rédigé par Pierre Diaz Pedregal en 2009, développe quant à lui une réflexion relative aux conditions climatiques à maintenir dans les magasins d'archives².

Le présent ouvrage se situe dans un contexte plus pratique. Il s'appuie sur l'analyse du fonctionnement de cinq bâtiments récemment construits, qui présentent des particularités ou des innovations dans leur conception climatique : bâti et équipements de traitement d'air. Il doit être utilisé comme un outil d'aide à la conception ou à l'amélioration d'un bâtiment d'archives et ne se substitue en aucun cas au travail des équipes de maîtrise d'œuvre.

¹ *Bâtiments d'archives, vingt ans d'architecture française (1965-1985)*, Paris, Archives nationales, 1986, 202 p.

Bâtiments d'archives, 1986-2003, Paris, Direction des Archives de France, 2004, 126 p.

Les archives dans la cité – architecture d'archives – 2004 à 2012, Paris, Service interministériel des Archives de France, 2013, 237 p.

² Ce manuel, diffusé au réseau des services d'archives publics par instruction DITN/RES/2009/014 du 23 novembre 2009 est disponible sur le site Internet des Archives de France.

Les dysfonctionnements climatiques constatés dans certains bâtiments d'archives permettent de souligner la complexité et la spécificité du sujet. En effet, le nombre et la diversité des paramètres à prendre en compte et des solutions techniques possibles expliquent les difficultés que peuvent rencontrer les concepteurs puis, à leur suite, les exploitants de ces bâtiments. Il ne s'agit pas dans un tel bâtiment de mettre en œuvre les traitements climatiques de confort, habituellement appliqués aux bâtiments d'habitations et aux bâtiments tertiaires traditionnels (bureaux, centres administratifs, lycées, collèges), mais plutôt de se rapprocher du secteur industriel plus complexe.

Tendances actuelles

Les deux dernières décennies ont été marquées par une évolution importante de la conception du traitement climatique des magasins dédiés à la conservation des archives. Les réalisations des années 1960 avaient en effet vu apparaître des équipements centralisés de chauffage et de ventilation, parfois associés à des systèmes d'humidification, l'ensemble étant installé le plus souvent dans des bâtiments sans isolation, avec des ouvrants en simple vitrage, dépourvus d'étanchéité. Dans les années 1980, « le tout 18 °C » poussa les concepteurs à réaliser des installations de climatisation centralisées surdimensionnées, dans des bâtiments faiblement isolés et peu étanches à l'air.

Depuis, de nombreux responsables d'établissements mettent en accusation la climatisation, car elle représente une source de dépenses importantes en énergie et en maintenance, et demande maîtrise et attention permanente. En effet, un certain nombre de sinistres, entraînant des dégradations sur les documents d'archives (moisissures, infestations...), sont apparus dans des bâtiments équipés de systèmes de climatisation suite à des dysfonctionnements de ces derniers. À telle enseigne qu'une réelle méfiance envers la climatisation a fini par s'installer, parfois de façon injustifiée.

Tout d'abord, il faut souligner l'utilisation souvent impropre du terme « climatisation » et rappeler quelques terminologies propres au domaine du génie climatique. Ainsi, dans les services d'archives, comme dans les milieux professionnels du bâtiment, on a tendance à confondre la climatisation de confort dont le but est de maintenir une température de confort pour les occupants et d'assurer le renouvellement d'air contrôlé d'un local, avec le conditionnement de l'air qui, en plus d'assurer le confort des occupants, doit répondre à des besoins spécifiques. Pour les bâtiments d'archives, ces besoins sont le contrôle de l'hygrométrie et le maintien de la qualité de l'air. En réalité, une installation de traitement d'air de magasins d'archives doit pouvoir assurer les fonctions de ventilation, de renouvellement d'air, de filtration et, selon la situation géographique, de chauffage, de rafraîchissement, d'humidification et de déshumidification.

D'autre part, des erreurs de conception peuvent être à l'origine de l'incapacité à maintenir un climat stable et à assurer les conditions climatiques indispensables à la bonne conservation des documents. On peut rappeler qu'il existe différentes techniques pour atteindre les objectifs climatiques recherchés et que ces nombreux procédés peuvent augmenter la complexité d'un projet.

En outre, une conduite inadaptée des équipements peut être également une cause de dérives climatiques néfastes pour la conservation des fonds. En effet, il n'est pas rare de constater que des désordres climatiques apparaissent alors que les installations ont été correctement réalisées.

Enfin, des désordres climatiques peuvent également survenir lorsque l'enveloppe du bâtiment est inadaptée, dépourvue d'inertie climatique, d'isolation et/ou d'étanchéité à l'air. Les équipements de traitement d'air ne sont pas capables de corriger ces désordres ni par conséquent d'assurer les performances climatiques recherchées.

Ce n'est qu'à partir des années 2000 que la notion d'inertie climatique s'est développée dans les bâtiments d'archives, associant l'isolation et l'inertie hygrothermique aux équipements de traitement d'air. Plus récemment, dans le cadre des politiques de développement durable, les nouvelles réglementations thermiques ont conduit les concepteurs à créer des bâtiments « hyper-isolés », à forte inertie, équipés de systèmes de ventilation et de renouvellement d'air dans lesquels on a parfois évité de recourir à une climatisation.

Objectifs

Dans ce manuel sont donc détaillées certaines erreurs de conception ou de conduite d'installation (maintenance), afin de mieux orienter les professionnels dans les choix techniques et les décisions qu'ils auront à prendre. Si dans les nouveaux bâtiments très isolés il y a de faibles besoins de chauffage ou de rafraîchissement pour maintenir la température souhaitée dans les magasins, il n'en va pas de même pour le maintien de l'hygrométrie. En effet, si l'on veut tenir les objectifs de stabilité de l'humidité relative (HR), il faut obligatoirement faire appel à la fonction d'humidification en hiver par temps froid, et en été, par temps chaud et humide, à la fonction de déshumidification.

Pour une meilleure compréhension, des exemples concrets sont présentés afin d'aider les concepteurs dans leur choix en développant les orientations architecturales pouvant apporter une meilleure gestion passive du climat des magasins d'archives, ainsi que les principes et les systèmes de traitement d'air les mieux adaptés au traitement dynamique du climat, pour chacun des projets de construction ou de réhabilitation de magasins d'archives.

Chapitre 1

Les contraintes climatiques
dans un bâtiment d'archives

Le « tout 18 °C » d'il y a quelques décennies aboutissait souvent à des installations de climatisation surdimensionnées, parfois inadaptées au traitement de l'hygrométrie, et de plus très énergivores. Depuis, les politiques de développement durable visant à diminuer de façon drastique les consommations d'énergie et les dégagements de gaz à effet de serre ont permis de remettre en question les préconisations en matière de conservation. C'est ainsi que les Archives de France, s'appuyant sur les études et les réflexions développées par Pierre Diaz Pedregal dans *Le petit manuel de climatologie*, ont fait évoluer leurs *Règles de base* en limitant les exigences climatiques de conservation, tout en soulignant le rôle prioritaire de l'enveloppe du bâti. En effet, comme certains projets récents ont pu le montrer, le recours à des installations de traitement d'air ne s'oppose pas à l'inertie climatique d'un bâtiment ; bien au contraire, il lui sera souvent complémentaire.

L'inertie climatique doit être prise en compte dès la conception d'un bâtiment d'archives. Le recours aux équipements de traitement d'air viendra en complément, principalement pour gérer l'hygrométrie.

1.1 Le comportement hygrothermique du papier

Le papier et le carton sont des matériaux à fort potentiel hygroscopique : ils sont capables d'absorber l'humidité de l'air et de désorber rapidement celle qu'ils contiennent pour s'équilibrer avec les conditions climatiques ambiantes. Compte tenu des volumes très importants d'archives contenus dans un magasin, ce sont donc de très grandes quantités de vapeur d'eau qui vont être émises ou absorbées lorsque le climat varie, quantités que vont devoir gérer les systèmes de traitement d'air pour maintenir des conditions climatiques stables et propices à la bonne conservation des documents.

1.1.1 Teneur en eau et humidité relative d'équilibre (HRE)

Teneur en eau

Le papier est constitué de matière organique issue de fibres végétales (coton, bois, etc.), contenant notamment de la cellulose. Comme les parchemins ou les cuirs que l'on trouve également en grandes quantités dans les magasins d'archives, il est parti-

culièrement hygroscopique et contient une quantité d'eau qui dépend de la température et de l'humidité relative de son environnement. Cette teneur en eau correspond à la masse d'eau contenue dans le papier par rapport à sa masse totale ; elle s'exprime en pourcentage. Dans les conditions climatiques habituellement rencontrées dans les magasins d'archives, la teneur en eau du papier se situe entre 5 % et 10 %.

La relation entre la teneur en eau du matériau et l'humidité relative de l'air est définie par des courbes appelées « isothermes d'adsorption du papier ». Pour chaque température, il existe une isotherme d'adsorption. Les courbes peuvent varier suivant le type de papier.

Dans un document en équilibre hydrique conservé à une température de 20 °C et une HR de 50 %, la teneur en eau du papier sera de 6,3 % (Figure 1). Lorsque ce document est en équilibre à 10 °C et 50 % d'HR, sa teneur en eau est de 6,8 % de sa masse totale.

Humidité relative d'équilibre

Le papier recherche en permanence l'équilibre avec l'air ambiant en adsorbant ou en désorbant l'humidité. L'« humidité relative d'équilibre (HRE) » encore appelée « eau

disponible » ou « eau libre » désigne l'humidité du matériau pouvant être échangée avec l'air ambiant.

Tout comme l'humidité relative de l'air, l'HRE varie avec la température et s'exprime en pourcentage.

L'équilibre hydrique entre l'air ambiant et le papier est obtenu lorsque son HRE est égale à l'HR de l'air ambiant.

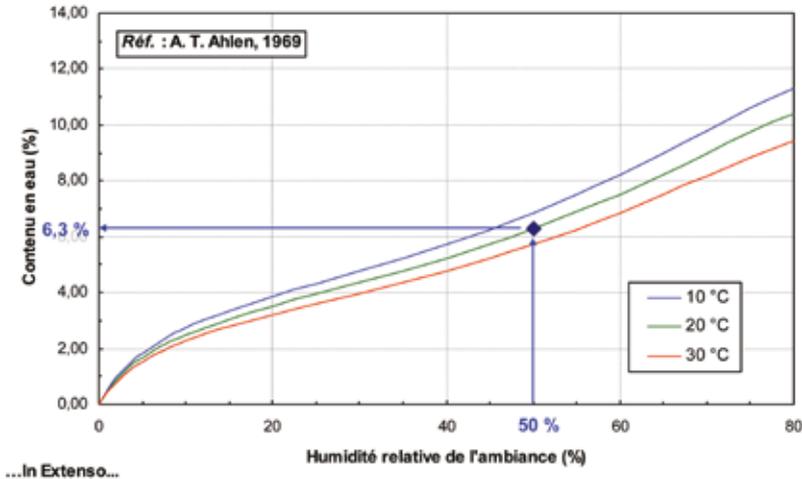


Figure 1. Isothermes d'adsorption du papier

1.1.2 Liens entre la teneur en eau des documents et celle de l'air environnant



En considérant un magasin d'archives de 200 m² ayant une hauteur sous plafond de 2,50 m ; son volume total est de 500 m³.

Dans le cas de rayonnages fixes, ce magasin contient 80 tonnes de documents papier, occupant environ 1 300 mètres linéaires de rayonnages.

Le volume des documents est estimé à un peu moins de 90 m³.

Le volume d'air restant dans le magasin est donc d'environ 410 m³.

L'air ambiant de ce local est stable aux conditions suivantes :

T = 20 °C ; HR = 50 % ; Teneur en eau = 7,4 g_n/kg_{as} ;

soit HA = 8,31 g/m³ ; volume massique = 0,89 m³/kg d'air

La contenance en vapeur d'eau de l'air ambiant du magasin plein est de :
410 m³ x 8,31 g/m³ = 3,410 kg

Dans cette ambiance stable, la teneur en eau du papier est de 6,3 %.

Les archives stockées dans le magasin contiennent :

80 000 kg x 0,063 = 5 040 kg d'eau

⊞ On constate que la masse de 3,41 kg de vapeur d'eau contenue dans l'air est en équilibre hydrique avec 5 040 kg d'eau contenue dans les documents d'archives.

Dans le cas de rayonnages mobiles, le magasin contient 120 tonnes de documents papier, occupant environ 2 000 mètres linéaires de rayonnages.

Le volume des documents est estimé à un peu moins de 140 m³.

Le volume d'air restant dans le magasin est donc d'environ 360 m³.

L'air ambiant de ce local est stable aux conditions suivantes :

T = 20 °C ; HR = 50 % ; Teneur en eau = 7,4 g_h/kg_{as} ; soit HA = 8,31g/m³

La contenance en vapeur d'eau de l'air ambiant du magasin plein est de :

360 m³ x 8,31 g/m³ = 2,992 kg

Sous cette ambiance, la teneur en eau du papier est de 6,3 %.

Les archives stockées dans le magasin contiennent :

120 000 kg x 0,063 = 7 560 kg d'eau

⊞ On constate donc qu'une masse de 2,99 kg de vapeur d'eau contenue dans l'air est en équilibre hydrique avec 7 560 kg d'eau contenue dans les documents d'archives.

Ainsi, le rapport entre la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air et la masse d'eau contenue dans les documents est d'environ :

1 sur 1 480 pour les rayonnages fixes

1 sur 2 500 pour les rayonnages mobiles.

Ce constat est essentiel et doit être intégré par les professionnels appelés à concevoir des équipements climatiques dans un bâtiment d'archives.

On comprend aisément que l'une des premières règles de conservation est d'éviter tout changement brutal des conditions environnementales dans un magasin d'archives. Une augmentation de la température de quelques degrés peut en effet entraîner une libération dans l'air de plusieurs kilogrammes de vapeur d'eau par les collections, ce qui a pour conséquence une augmentation importante et rapide de l'humidité relative.

Sur les matériaux organiques, les fluctuations de l'HR ont pour effet de provoquer des variations dimensionnelles, qui avec le temps, vont conduire à leur fragilisation.

Une humidité trop importante provoquera l'apparition de moisissures, des phénomènes d'hydrolyse ou d'oxydation, mais aussi des transferts, des dilutions d'encres et de pigments. Si l'air est sec, on observera l'apparition de fentes et de déchirures, le matériau deviendra cassant et difficile à manipuler.

Seule la stabilité des conditions de température et d'humidité relative peut éviter la fragilisation mécanique des documents, l'apparition de moisissures et les transformations physico-chimiques liées à ces variations.

1.2 Les conditions de conservation dans les magasins d'archives (T, HR, et poids d'eau)

Bien que les préconisations aient évolué depuis une dizaine d'années, le principe selon lequel les documents se conservent plus longtemps à basse température et à un taux d'humidité relative faible reste vrai.

Les courbes isopermes (Figure 2) indiquent que l'altération du papier augmente en cas d'élévation de la température et de l'HR de son environnement.

Le point de référence avec $T = 20\text{ °C}$ et $HR = 50\%$ se situe sur l'isoperme de valeur 1. Si l'on considère arbitrairement que dans ces conditions les documents ont une durée de vie de 100 ans, pour une température de 25 °C et une HR de 50% , l'isoperme indique une valeur de 0,5. Cela signifie que la durée de vie serait réduite de moitié, soit 50 ans.

Dans l'absolu, il est préférable de maintenir le climat à 16 °C , 45% d'HR, plutôt qu'à 23 °C et 57% d'HR.

Ainsi, les mesures à prendre doivent viser à faire descendre la température et l'hygrométrie.

1.2.1 Quelle température adopter dans les magasins ?

Plutôt que les 18 °C observés toute l'année et 24 heures sur 24, on admet aujourd'hui une plage plus étendue de température. L'objectif est de suivre l'évolution annuelle des températures extérieures tout en s'assurant que celle des magasins varie lentement.

La plage de température préconisée est la suivante :

$$16\text{ °C} < \text{Température} < 23\text{ °C}$$

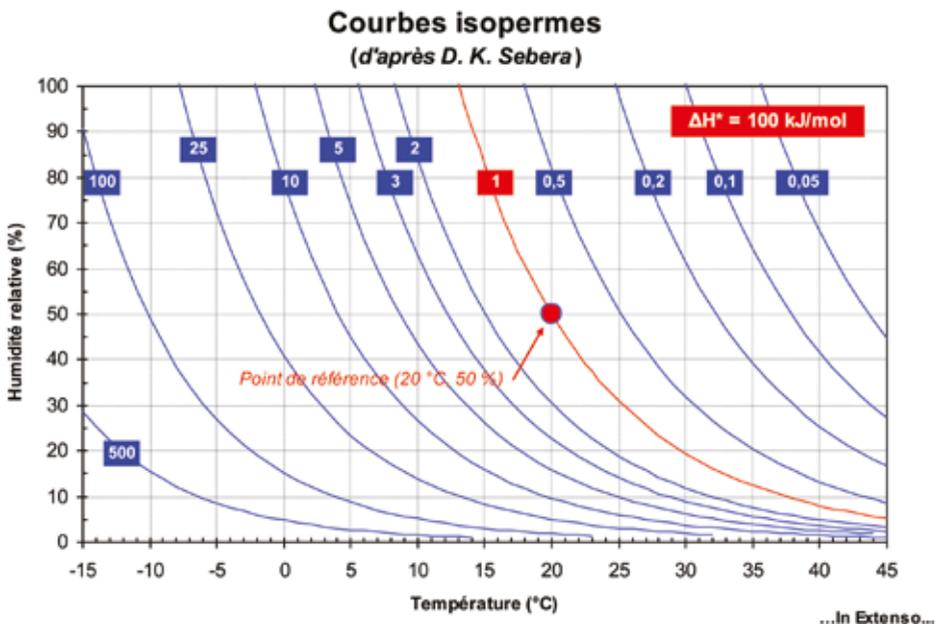


Figure 2. Courbes isopermes pour le papier

Les bases de calcul pour le dimensionnement des équipements climatiques sont :

- > en hiver : $17 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$;
- > en été : $22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$;
- > des variations maximales de 2°C par semaine et de 1°C par jour sont admises.

Remarques importantes

- > Le passage des conditions hivernales vers les conditions estivales (et inversement) doit se faire très progressivement et suivre la règle édictée ci-dessus, soit 1°C de variation maximale par jour et 2°C par semaine.
- > Une élévation de la température ne doit pas être accompagnée simultanément par une hausse de l'hygrométrie, au risque de créer des conditions favorables au développement des moisissures.
- > D'un point de vue pratique, la modification du point de consigne peut se faire soit en laissant dériver les valeurs entre 16°C et 23°C , soit automatiquement par un paramétrage de l'automate de la régulation. Dans le cadre de la conduite d'installation, des adaptations de points de consigne en fonction de conditions extérieures extrêmes peuvent être envisagées. Nous évoquerons ces points dans le paragraphe 3.1 *Les niveaux de maintenance*.

1.2.2 Quelle humidité relative adopter dans les magasins ?

De même que pour la température, plutôt que d'imposer une valeur fixe toute l'année, on admet aujourd'hui, dans les magasins, une fourchette d'humidité relative qui suit les évolutions extérieures.

La plage d'humidité relative préconisée est la suivante :

40 % < Humidité Relative < 55 %

Les bases de calcul pour le dimensionnement des équipements climatiques sont les suivantes :

- > en hiver : $45\% \pm 5\%$;
- > en été : $50\% \pm 5\%$;
- > des variations maximales de 5% par jour sont admises.

1.2.3 Poids d'eau – valeur recommandée

Le poids d'eau se définit dans le domaine du génie climatique comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans une unité de masse d'air sec. Il s'exprime en grammes ou kilogrammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec ($\text{g}_h/\text{kg}_{as}$).

Les professionnels utilisent également les termes d'humidité spécifique ou de teneur en eau. L'humidité absolue quant à elle, correspond à la masse d'eau contenue dans 1 m^3 d'air.

L'ambiance d'un magasin d'archives doit rester dans une fourchette comprise entre les valeurs suivantes :

- > pour 16°C et 40 % HR :
poids d'eau = $4,6 \text{ g}_h/\text{kg}_{as}$;
- > pour 23°C et 50 % HR :
poids d'eau = $9,7 \text{ g}_h/\text{kg}_{as}$.

L'ambiance d'un magasin d'archives doit rester entre les deux seuils suivants :

$4,6 \text{ g}_h/\text{kg}_{as} < \text{Poids d'eau} < 9,7 \text{ g}_h/\text{kg}_{as}$

Comme pour la température et l'HR, le poids d'eau doit rester stable et varier lentement entre ces deux seuils en fonction des saisons.

Remarques importantes

- > Lorsque l'on connaît le débit d'air neuf introduit dans un magasin, la différence de teneur en eau entre l'air extérieur et l'air ambiant permet de calculer la puissance de déshumidification nécessaire pour évacuer la quantité de vapeur d'eau de l'air extérieur nécessaire pour obtenir l'HR souhaitée.
- > Si l'on établit une courbe annuelle de l'évolution de la teneur en eau extérieure dans nos climats tempérés, on constate qu'elle varie de manière importante au cours d'une année.
- > En hiver par grand froid, la teneur en eau est très faible ; pour des températures négatives, elle peut atteindre $2 \text{ g}_h/\text{kg}_{as}$. Il faut donc humidifier.
- > En été, durant des périodes orageuses, elle peut atteindre $18 \text{ g}_h/\text{kg}_{as}$, il faut alors déshumidifier.
- > Tout au long de l'année, cette teneur en eau va fluctuer autour de la courbe moyenne de la région concernée.

1.2.4 Les conditions climatiques à adopter dans les magasins de conservation

En conclusion, la zone dite « de sécurité climatique » pour la conservation des collections d'archives se situe dans les limites suivantes :

- > $16 \text{ °C} \leq \text{Température} \leq 23 \text{ °C}$;
- > $40 \% \leq \text{HR} \leq 55 \%$;
- > $4,6 \text{ g}_h/\text{kg}_{as} \leq \text{Poids d'eau} \leq 9,7 \text{ g}_h/\text{kg}_{as}$.

1.2.5 Les conditions climatiques extérieures (bases de calcul)

Pour définir les besoins en traitement d'air (chauffage, climatisation, humidification ou déshumidification) d'un bâtiment d'archives dans une région donnée et dimensionner les appareils, il est possible d'utiliser les sources de données climatiques suivantes :

- > le site internet de Météo France ou tout autre site météorologique qui fournit des valeurs ;
- > la réglementation thermique RT 2012, qui définit des valeurs de base de température extérieure pour chaque région (voir paragraphe 2.4.1).

Pour le calcul des charges, il est conseillé de rajouter une surpuissance de 20 % afin de couvrir les besoins en chauffage lors de périodes de grand froid en hiver et les besoins en rafraîchissement lors des périodes de canicule en été.

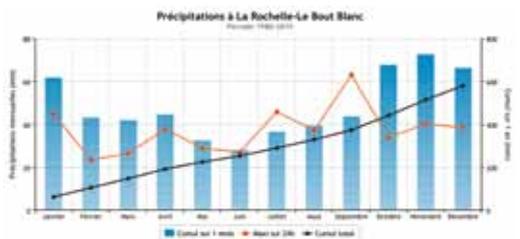
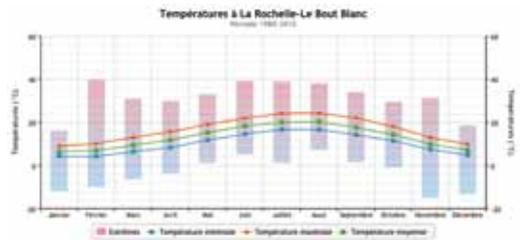


Figure 3. Représentation des relevés climatiques de la station météorologique de La Rochelle-Le Bout Blanc pour la période 1980-2015

1.3 La ventilation, le renouvellement d'air et la filtration dans un magasin d'archives

Dans les magasins d'archives, il est nécessaire d'assurer une ventilation afin d'éviter le confinement et d'évacuer les polluants (composés volatils) provenant des matériaux de construction et des documents eux-mêmes.

La qualité de l'air dépend du brassage et du renouvellement d'air mais également de l'efficacité de sa diffusion et de sa filtration.

1.3.1 Le renouvellement d'air d'un magasin

Le renouvellement d'air est exprimé en m^3 ou en volume du local par heure, et correspond à la quantité d'air neuf extérieur qui sera introduit à l'intérieur d'un magasin. Le taux de renouvellement correspond au rapport entre la quantité d'air neuf introduite dans le magasin et le volume du local (en moyenne $500 m^3$ pour un magasin type).

La réglementation sanitaire départementale et le code du travail imposent un renouvellement d'air par occupant qui dépend de l'activité exercée.

Ainsi pour une activité de magasinage, le débit d'air hygiénique minimum est de $30 m^3/h$ par personne.

Cette valeur représente, pour un magasin standard de $500 m^3$, un renouvellement d'air minimum imposé de $0,06 vol/h$. Dans le cas d'un magasin d'archives, cette valeur est surévaluée puisque l'on considère qu'un magasinier va y passer en moyenne 1 heure par jour, sauf lors des déménagements, des inventaires, et des opérations de dépoussiérage.

Auparavant, le renouvellement d'air recommandé était de $0,5 vol/h$. Pour répondre aux politiques énergétiques axées sur de fortes diminutions des consommations d'énergie, les Archives de France ont abaissé cette valeur à $0,1 vol/h$ en 2009. Pour atteindre cette valeur, il est indispensable que le bâtiment ait un très faible coefficient de perméabilité à l'air, ce qui impose la mise en place de pare-vapeurs sur toute l'enveloppe du bâti et l'implantation des magasins en partie centrale de la construction.

Il est à noter que plus le renouvellement d'air d'un local est important, plus on consomme de l'énergie pour le chauffer ou le refroidir, mais également pour l'humidifier ou le déshumidifier.

Les préconisations pour les bâtiments neufs sont donc les suivantes :

- > lors de l'emménagement des archives, ou lors d'épisodes d'infestations, d'inondations ou de dégagement de polluants il faut pouvoir disposer d'un renouvellement d'air plus important, de l'ordre de **$0,30 vol/h$** . Les calculs de puissances des batteries des CTA et des besoins nécessaires à la régulation de l'hygrométrie (humidification et déshumidification) se baseront sur ce débit d'air ;
- > en régime stable, lorsque l'équilibre de la température et de l'hygrométrie est atteint, le renouvellement d'air peut être abaissé à **$0,10 vol/h$** . Cette action aura évidemment un impact très important sur la diminution des consommations d'énergie ;
- > en cas d'orage ou de fortes pluies, en période de canicule ou de grand froid, l'introduction d'air neuf peut être temporairement arrêtée. Cet arrêt peut être limité à quelques heures, voire quelques semaines comme c'est le cas aux Archives départementales des Yvelines (voir paragraphe 5.2.4).

Il est à noter que lorsque l'introduction d'air neuf est à l'arrêt, **les ventilateurs assurant le brassage d'air dans les magasins restent en fonctionnement** (recyclage de l'air).

Dans le cadre de la rénovation d'un bâtiment d'archives existant, il sera certainement plus difficile d'adopter les mêmes conditions que pour les bâtiments neufs. En effet, même après des travaux d'amélioration, la perméabilité à l'air dans un bâtiment ancien restera importante et exposera les magasins à des entrées d'air extérieur parasites qui auront pour effet de déstabiliser l'hygrométrie.

Dans les bâtiments existants, on adoptera comme base de calcul un renouvellement d'air de **0,30 vol/h**, afin de compenser le déséquilibre climatique provoqué par la perméabilité de l'enveloppe du bâti et assurer une légère surpression dans les magasins.

1.3.2 La ventilation et le brassage d'air

Le brassage d'air est le rapport entre le débit d'air soufflé dans un local et le volume de celui-ci. Avec la diffusion de l'air, il conditionne l'homogénéité de la température et de l'HR dans un magasin, et limite les risques de développement des moisissures.

En général, les calculs permettant de déterminer le brassage d'air tiennent compte des charges thermiques et hydriques à combattre dans un local. Celui-ci est inversement proportionnel à l'écart entre la température de l'air soufflé et la température ambiante du local.

Pour abaisser le débit de recyclage de l'air et faire des économies d'énergie sur les moteurs de ventilation, on peut augmenter l'écart de température et d'humidité entre

le soufflage et l'ambiance, mais si le brassage est insuffisant, l'homogénéité du climat du magasin risque de se dégrader.

Ainsi :

Pour les constructions neuves :

Du fait de la très grande efficacité de l'isolation thermique et de l'étanchéité à l'air des bâtiments (réalisées suivant les règles de la RT 2012), les charges (déperditions et apports) étant très faibles, le brassage d'air préconisé est de **2 vol/h** à condition :

- > de disposer d'équipements de diffusion d'air à très haute induction ;
- > que la diffusion de l'air entre les rayonnages soit homogène (en évitant les zones de confinement) ;
- > que la filtration de l'air soit efficace (voir paragraphe 1.3.4).

Pour les réhabilitations :

Compte tenu des contraintes inhérentes à un site rénové, il convient de le calculer en fonction des charges du magasin (déperditions et apports), avec un minimum de brassage d'air de **3 vol/h**.

1.3.3 La diffusion de l'air

Pour assurer une bonne répartition de l'air dans l'espace d'un magasin, on veillera à respecter les règles suivantes :

- > la diffusion de l'air doit être réalisée avec des diffuseurs à fort taux d'induction, ce qui permet de réduire, dans le cône de diffusion, les écarts de température entre l'air soufflé et l'ambiance et d'améliorer ainsi l'homogénéité du climat d'un magasin ;
- > le flux d'air doit être parallèle aux rayonnages et la reprise d'air permettre un balayage complet du magasin. Un soufflage perpendiculaire aux rayonnages engendre des mouvements d'air instables et des poches d'air confiné. Il ne faut surtout

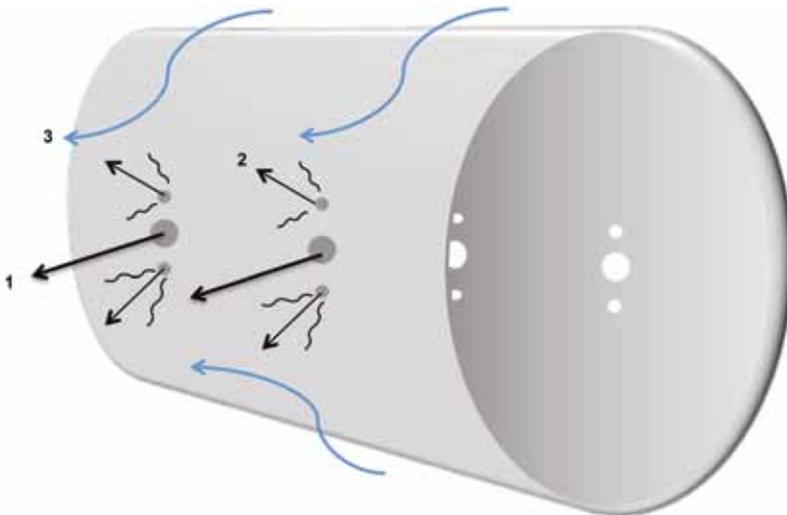
pas disposer des archives directement dans le flux d'air d'une bouche de soufflage, sachant que le cône de diffusion est l'endroit où l'air est le plus instable ;

- > les documents disposés en haut des rayonnages ne doivent pas faire obstacle à la bonne diffusion de l'air. Il doit y avoir un espace libre d'environ 0,30 m sous le plafond ou les retombées de poutres. La hauteur sous-plafond d'un magasin doit donc être au minimum de 2,60 m, un peu plus donc que les 2,50 m préconisés il y a quelques années ;
- > avec des rayonnages mobiles, le brassage et la diffusion d'air entre les rayonnages se trouvent contrariés. Il est conseillé de déplacer périodiquement leur positionnement de façon à ce que tous les rayonnages puissent être ventilés. L'utilisation de montants de rayonnage ajourés (panneaux percés de petits trous) permet d'apporter un minimum d'aération dans les rayonnages mobiles.

Il est possible d'améliorer la diffusion et le brassage d'air grâce à l'installation de petits ventilateurs souvent appelés « brasseurs d'air » (voir les photographies dans le paragraphe 5.2.4 -Archives départementales des Yvelines, et le paragraphe 5.5.4 -Archives départementales du Nord).

Il existe depuis quelques années des fabricants de réseaux aérauliques de diffusion d'air constitués de gaines de soufflage métalliques perforées, permettant d'obtenir une très forte induction et une excellente homogénéité de l'air ambiant d'un magasin.

Cette technologie, qui a été mise en œuvre aux Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine (voir la description détaillée du paragraphe 5.1.4), permet de diminuer le débit de brassage d'air des magasins et ainsi la puissance des moteurs des ventilateurs des centrales de recyclage d'air, ce qui génère de sérieuses économies d'énergie.



- 1 : Trous primaires : définissent la direction de soufflage souhaitée par la gaine ainsi que sa zone d'influence
- 2 : Trous secondaires : plus petits, ils induisent de manière très rapide, la masse d'air ambiante pour la fusionner à l'air de soufflage
- 3 : Air ambiant repris par le phénomène d'induction

Figure 4. Schéma de principe d'une diffusion à très haute induction

Sur le même principe, il existe des gaines textiles de diffusion d'air plus légères et moins coûteuses. Ces gaines sont néanmoins plus sujettes à l'empoussièremment que les gaines métalliques et nécessitent donc une charge de maintenance supplémentaire consistant à les déposer, puis à les passer en machine à laver industrielle, pour les reposer après séchage. Ces manipulations effectuées à l'intérieur des magasins constituent une contrainte que les concepteurs-utilisateurs doivent bien appréhender. La fréquence de ces déposes-lavages-reposes dépend étroitement du nettoyage et du remplacement des filtres des centrales de traitement d'air.

1.3.4 La filtration de l'air

Les moisissures apparaissent lorsqu'elles ont la possibilité de puiser l'humidité du support sur lequel elles se développent. Or, les poussières constituent non seulement un milieu nutritif, mais également une source d'humidité favorable à la germination puis la croissance des moisissures.

Dans les magasins d'archives, la filtration de l'air est donc une fonction incontournable. Son but est d'amener l'air soufflé à des conditions de pureté permettant :

- > de protéger les documents d'archives contre l'empoussièremment, les polluants chimiques et les germes divers ;
- > d'éviter l'encrassement des équipements de traitement d'air (batteries, centrales de traitement d'air, réseaux aérauliques et diffuseurs).

Les filtres sont classés en fonction de leur efficacité mesurée à partir de tests effectués sur des bancs d'essai. Les nouvelles normes européennes EN 779:2012 classent les filtres suivant différentes catégories :

- > les pré-filtres classés de G1 à G4 pour la filtration de grosses particules, jusqu'à 10 µm ;

- > les filtres classés M5 et M6 pour la filtration des particules moyennes jusqu'à 1 µm. Il s'agit des filtres F5 et F6 dans l'ancienne classification ;
- > les filtres fins classés de F7 à F9 pour la filtration de particules fines jusqu'à 0,4 µm.

La filtration de haute efficacité répond à la norme européenne EN 1822 : 2009 qui distingue :

- > les filtres particuliers efficaces, EPA, classés de E10 à E12 ;
- > les filtres particuliers à haute efficacité, HEPA classés H13 et H14 ;
- > les filtres à pénétration ultra faible, ULPA classés de U15 à U17.

Dans les magasins d'archives « standards », il est préconisé d'installer dans les centrales de traitement d'air :

- > une pré-filtration, d'efficacité au test gravimétrique G4 ;
- > une filtration fine F, de préférence d'efficacité au test opacimétrique F8.

La filtration chimique permet de piéger les polluants gazeux. Elle élimine des odeurs, limite la corrosion des métaux ou la dégradation des matériaux organiques.

On trouve également des systèmes de filtration électrostatiques qui fonctionnent sur le principe de l'attraction magnétique : les particules de poussière ou les micro-organismes reçoivent une charge électrostatique, puis sont collés sur les fibres du média de polarité opposée. Ces systèmes sont efficaces sur des particules pouvant atteindre 1/100^e de micron. Ils perdent toutefois leur efficacité au cours de leur cycle de vie et sont sensibles à certains produits chimiques ou aux hygrométries élevées.

Des unités autonomes de décontamination ont déjà été utilisées avec succès dans des services ayant connu des infestations importantes. Il s'agit d'unités mobiles et autonomes, qui assurent une bio-

décontamination par filtration particulaire haute performance pouvant être combinée à une destruction des particules organiques par plasma froid¹ et à une filtration chimique (charbon actif) pour l'élimination des odeurs. Leur action est temporaire ; si on les arrête sans avoir désinfecté les surfaces et les documents et traité la cause de la contamination, celle-ci reprend. Il est à noter que le coût de ces appareils reste assez élevé, et qu'ils nécessitent un suivi et un entretien rigoureux.

1.4 Conditions climatiques et aménagement des magasins spéciaux et locaux spécifiques

1.4.1 Les magasins spéciaux

Pour un certain nombre de collections plus vulnérables aux fluctuations de leur environnement, les conditions de conservation sont plus exigeantes.

Parmi ces documents particuliers, on trouve les microfilms, les collections photographiques et audiovisuelles, et notamment :

- > certains films cinématographiques et négatifs sur support souple ;
- > les photographies en couleur ;
- > les supports magnétiques (bandes numériques, vidéo, bandes sonores).

Ces fonds photographiques et audiovisuels nécessitent des conditions climatiques et des aménagements différents de ceux des magasins standard.



Conditions climatiques

Les conditions de conservation recommandées sont les suivantes, en fonction des supports des collections photographiques et multimédias :

Pour les tirages et négatifs photographiques et microfilms (procédés noir et blanc et à colorants pigmentaires sur supports polyester et verre), cartes postales, vidéos et supports optiques numériques :

- > HR : 40 % ± 3 %
Variation journalière maximale : 3 % ;
- > température : 17 °C ± 1 °C
Variation journalière maximale : 1 °C ;
- > renouvellement d'air : 0,1 vol/ h ;
- > brassage d'air : 3 vol/h minimum.

Pour les négatifs et tirages couleur (procédés chromogéniques, supports nitrate et acétate de cellulose), conservés en chambre froide :

- > HR : 35 % ± 3 %
Variation journalière maximale : 3 % ;
- > température : 2 °C ± 1 °C
Variation journalière maximale : 1 °C ;

¹ Ensemble de molécules ionisées et électrons générés par décharge électrique dans un gaz à pression atmosphérique. Ces espèces fortement réactives modifient la structure des particules organiques qui entrent en contact avec elles.

- > renouvellement d'air : 0,2 vol/h ;
- > brassage d'air : 3 vol/h minimum.

Certaines collections audiovisuelles et photographiques peuvent émettre des composés volatils nocifs. Il est donc important de renouveler et/ou de filtrer chimiquement l'air de ces magasins (filtration sur l'air recyclé).

La création de sas intermédiaires assurant une transition climatique permet d'acclimater les collections lorsqu'elles sortent de la chambre froide. Le temps d'adaptation dépend de l'écart du climat entre le magasin d'origine des documents et leur nouvel espace de stockage. Pour éviter les phénomènes de condensation, la température du sas sera comprise entre 12 °C et 15 °C et son hygrométrie entre 40 % et 50 %. Dans tous les cas, un calcul précis du point de rosée doit être effectué en fonction de la température de la chambre froide et de celle du sas, afin de choisir les consignes climatiques du sas. Il convient de définir un protocole de sortie des documents, sur plusieurs journées, afin de permettre aux documents de s'équilibrer.

Aménagement des magasins spéciaux

Lorsque les objectifs climatiques de conservation nécessitent des températures très basses toute l'année, on se retrouve confronté à des problèmes d'apports de chaleur provenant des locaux mitoyens, mais également de migration de l'humidité à travers les parois du magasin, pouvant créer des risques de condensation surfacique ou dans la masse des parois.

Pour faire face à ces risques, on est amené à construire « une boîte dans la boîte », dont les dimensions devront être étudiées en fonction de l'importance et de l'évolution possible des collections.

Les six parois (murs, plancher et plafond) de ce magasin doivent être pourvues d'une isolation thermique très performante et d'un pare-vapeur très efficace. Les matériaux utilisés doivent être inertes (pas de dégagement de COV).

Pour répondre à ces contraintes, il est préférable d'avoir recours à « la construction de chambres climatiques » en panneaux préfabriqués modulaires, classés M1, avec isolant thermique et pare-vapeur, type panneaux sandwichs avec laine de roche. Les planchers doivent être renforcés et recouverts d'un revêtement antidérapant. Des portes isolantes suffisamment larges, entourées de joint étanche à l'air et équipées d'une barre anti-panique doivent permettre la circulation des chariots. Ces équipements doivent être envisagés dès la phase d'étude, de façon à intégrer l'isolation du plancher dans la dalle, afin d'éviter les différences de niveau du sol.

Les constructeurs de chambres climatiques proposent des ensembles compacts, fabriqués sur mesure et livrés clef en main. Ils se composent d'équipements de traitement d'air intégrés dans des placards techniques mitoyens aux magasins, comprenant un compartiment électricité et régulation et un compartiment équipements frigorifiques.

Ces équipements comprennent en général :

- > des condenseurs à air implantés à l'extérieur du bâtiment (terrasse ou local technique) ;
- > une pré-filtration (plus rarement une filtration d'efficacité F9) ;
- > des batteries froides de rafraîchissement et de déshumidification ;
- > des batteries chaudes constituées de résistances électriques blindées ;
- > un humidificateur assurant la fonction humidification peut être nécessaire ; il permettra de mieux stabiliser l'HR ambiante ;



Image 2. Chambre froide aux Archives départementales du Cher

- > un ventilateur assurant le brassage d'air du magasin. Le débit d'air se situe habituellement entre 3 et 5 vol/h ;
- > des automates de régulation de température et d'hygrométrie. Leurs paramètres doivent être accessibles par une supervision de gestion technique centralisée.

Nota : Dans le cas d'une chambre froide à basse température, les systèmes frigorifiques de déshumidification atteignent leurs limites à cause du givre des installations. Il est alors nécessaire d'utiliser des systèmes autonomes à adsorption qui assurent une fonction de déshydratation. Certains systèmes peuvent créer un dégagement de chaleur dont il convient de tenir compte.

Il est nécessaire de renouveler l'air de ces enceintes climatiques, afin d'évacuer les émanations de gaz polluants provenant des collections. Le débit d'air de renouvellement doit rester faible, autour de 0,1 vol/h, avec un maximum de 0,2 vol/h. L'idéal est d'assurer le traitement hygrométrique de

cet air neuf en amont de son introduction dans la chambre froide.

Dans le cas contraire, les équipements de contrôle de l'hygrométrie internes à la chambre froide devront être dimensionnés en conséquence.

Il est aussi possible d'assainir l'air en utilisant une filtration chimique adaptée (charbon actif, alumine). Ceci peut permettre de diminuer voire d'éviter l'introduction d'air neuf. Il est indispensable de changer régulièrement les filtres (une fois par an).

Une extraction d'un débit d'air inférieur à celui du soufflage doit permettre de maintenir ces enceintes climatiques en légère surpression.

Les débits de renouvellement d'air étant très faibles (entre 10 et 20 m³/h suivant la taille des enceintes), il faudra utiliser des équipements adaptés.

1.4.2 Les locaux de traitement des documents

Dans ces locaux, la présence de documents pour une durée plus ou moins longue nécessite de maîtriser les conditions climatiques. Des équipements de traitement d'air individualisés pour chaque local sont préconisés de façon à s'adapter aux types d'activité et au nombre de personnes présentes dans chaque espace. Le traitement de l'hygrométrie peut toutefois être réalisé en amont par l'introduction d'air neuf aux conditions souhaitées.

Local de quarantaine

C'est dans ce local que transitent les documents contaminés, ce qui implique une implantation isolée des autres locaux de stockage (ou de traitement) et proche de l'entrée des collections.

Le traitement du climat doit permettre une mise en dépression du local et des conditions de température proches de celles des magasins d'archives, c'est-à-dire entre 16 °C et 23 °C. Pour l'hygrométrie, il est important de disposer d'un système de déshumidification, de manière à stopper le développement des moisissures. Le maintien d'une HR entre 40 % et 50 % est conseillé.

Les équipements techniques doivent pouvoir assurer les fonctions suivantes :

- > l'extraction d'air vers l'extérieur sans recyclage possible, à l'aide d'un extracteur à débit variable qui permettra de calibrer le débit d'extraction en fonction des besoins. On recommande généralement un renouvellement d'air compris entre 0,5 et 3 vol/h ;
- > la déshumidification peut être assurée par des déshumidificateurs ou des déshydrateurs autonomes. On prendra soin de ne pas les réutiliser dans d'autres espaces sans avoir, au préalable, remplacé les filtres et désinfecté tous les éléments constituant ces appareils ;
- > des équipements pour le maintien de la température du type ventilo-convecteurs (ou similaire) sont conseillés ;
- > dans les sites importants appelés à recevoir des documents précieux et fragiles, il est souhaitable de mettre en œuvre une armoire de traitement d'air de précision, associée à une extraction d'air.

Salle de tri

Ces espaces sont l'antichambre des magasins et doivent être implantés à leur proximité pour faciliter la manipulation des documents.

Les conditions d'hygrométrie doivent être similaires à celles des magasins ; en revanche, la température devra tenir compte du confort du personnel travaillant dans ce local (entre 19 °C et 24 °C suivant les saisons). La régulation (température et HR) doit donc être indépendante de celle des magasins. Contrairement aux magasins, ce local doit disposer de lumière naturelle et le renouvellement d'air doit tenir compte du nombre de personnes y travaillant.

Les charges (apports, déperditions et renouvellement d'air) sont évidemment plus importantes que celles des magasins, et à ce titre, sont recommandées :

- > des baies vitrées de préférence exposées au nord ou équipées de pare-soleil extérieurs permettant d'éviter tout rayonnement solaire direct ;

- > une gestion rigoureuse du taux de renouvellement d'air en fonction de l'occupation des locaux, qui permettra d'optimiser les consommations d'énergie. Le nombre d'opérateurs travaillant dans cette salle doit être précisé par les futurs utilisateurs.

Le traitement d'air pourra être réalisé par une armoire de climatisation de précision (ou une petite CTA) dédiée et assurant les fonctions de filtration, ventilation, renouvellement de l'air, chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification.

On trouve parfois des locaux de tri en étage qui servent de stockage provisoire des documents avant leur rangement définitif dans les magasins. Ces locaux doivent être traités comme une salle de tri, c'est-à-dire avec contrôle de la température et de l'hygrométrie. La régulation doit également être indépendante de celle des magasins, afin de respecter le confort du personnel y travaillant.



Image 3. Salle de tri aux Archives départementales de la Haute-Corse

1.4.3 Les ateliers

Les contraintes rencontrées lors de l'aménagement de ces espaces nécessitent une parfaite collaboration entre les futurs utilisateurs, l'architecte et les bureaux d'études. Les utilisateurs doivent communiquer au maître d'œuvre chargé du projet un programme détaillé de leurs besoins et des équipements prévus dans chaque local. Ce programme doit définir l'implantation de tous les équipements envisagés dans chaque atelier. Un schéma fonctionnel des activités prévues permettra de réaliser le zonage des espaces suivant les différentes contraintes.

Les ateliers de dépoussiérage

Le dépoussiérage des documents constitue une intervention préventive importante qui permettra de limiter les risques de développement de moisissures et les altérations mécaniques par abrasion.

L'atelier de dépoussiérage est un lieu aménagé pour réaliser l'aspiration des poussières. Suivant l'importance du site, un système d'aspiration centralisé pourra être installé. Il sera constitué de buses d'aspiration associées à des bras articulés munis de cônes ou de flexibles d'aspiration et réparties aux différents postes de travail, ainsi que d'un réseau de canalisations d'extraction d'air vicié, qui sera raccordé sur la centrale d'aspiration.

Pour des raisons de nuisances sonores, la centrale d'aspiration doit être implantée dans un local dédié, mitoyen des ateliers concernés. Dans ce local, il faudra disposer d'une canalisation de rejet d'air vicié vers l'extérieur du bâtiment.

Les équipements de traitement d'air de cet atelier doivent pouvoir assurer le maintien du confort, ainsi qu'une fonction de déshumidification. Le renouvellement d'air doit être fonction du nombre d'occupants, à raison de 45 m³/h par personne, et assurer l'introduction d'air de compensation, équivalente au débit d'air extrait par la centrale de dépoussiérage ou aux postes de travail. Dans le cadre d'une gestion rigoureuse de l'énergie, il faudra prévoir la fermeture de l'air hygiénique en période d'inoccupation.

Les ateliers de restauration

Les différents procédés de restauration peuvent fragiliser les matériaux constituant les documents d'archives. Il est donc important de disposer d'ateliers adaptés à la nature des activités dont le climat reste le plus stable possible. Le problème est complexe, puisqu'il s'agit de maintenir le confort des occupants et une parfaite stabilité de l'hygrométrie, d'assurer l'apport d'air hygiénique de compensation et d'extraire les gaz toxiques aux postes de travail.

Dans tous les espaces dans lesquels les documents d'archives séjournent plusieurs jours voire plusieurs semaines, les conditions d'hygrométrie doivent être similaires à celles des magasins. En revanche, la température devra également tenir compte du confort du personnel travaillant dans ces locaux (entre 19 et 24 °C suivant les saisons).

Ces ateliers doivent disposer de lumière naturelle et le renouvellement d'air doit être fonction du nombre d'occupants, soit 45 m³/h par personne. Le débit d'introduction d'air de compensation devra être équivalent à celui de l'air extrait aux différents postes de travail.



Image 4. Atelier de restauration des seaux aux Archives départementales du Cher

Les charges (apports, déperditions et renouvellement d'air) sont évidemment plus importantes que celles des magasins. Il est préconisé, comme pour les salles de tri :

- > des baies vitrées, exposées de préférence au nord ou munies de protections et de pare-soleil extérieurs ;
- > une gestion rigoureuse du taux de renouvellement d'air minimum, en fonction de l'occupation des locaux ;
- > un asservissement de l'introduction de l'air de compensation au fur et à mesure de la mise en service des équipements des postes de travail (hottes, bras articulés, sorbonnes, extraction d'enceintes, etc.). Ainsi, à chaque mise en service d'un équipement comprenant une extraction d'air spécifique, on adaptera le débit d'air de compensation.

Les équipements de traitement d'air devront assurer les fonctions de filtration, ventilation, renouvellement de l'air, extraction d'air vicié, chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification. Une petite CTA à débit variable, assurant pour l'ensemble des ateliers la préparation en température et en poids d'eau de l'air neuf hygiénique, associée à des uni-

tés de traitement d'air locales (gestion de la température ambiante) est une des solutions qui permet de répondre aux contraintes de ces lieux.

L'introduction d'air hygiénique de compensation doit être asservie aux horaires d'occupation des locaux et aux extracteurs d'air vicié.

Le laboratoire photographique

Dans ce type de laboratoire, on peut trouver :

- > un local de prise de vues / numérisation ;
- > le local de développement ;
- > une chambre noire ;
- > un local de tirage de microfilms ;
- > un local de tirage de photographies ;
- > un local machinerie.

Là encore, la réussite du projet dépendra de la parfaite collaboration entre les utilisateurs, les maîtres d'œuvre et les bureaux d'études. Les futurs utilisateurs devront établir un programme détaillé des aménagements à prévoir et une liste précise des équipements envisagés dans chaque local avec leurs caractéristiques techniques (électricité, fluides, climat, contraintes particulières, dégagements calorifiques, etc.).

Comme pour les ateliers de restauration, les équipements de traitement d'air doivent assurer les fonctions de filtration, ventilation, renouvellement de l'air, extraction d'air vicié, chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification. Les principes de traitement d'air proposés pour les ateliers de restauration peuvent être adoptés, à savoir une CTA de préparation d'air hygiénique, associée à des unités terminales par local et des extractions aux postes de travail.

Le concepteur devra tenir compte dans ses calculs, des apports de chaleur dégagés dans chaque local et des spécificités de chaque équipement. Une gestion rigoureuse du renouvellement d'air, en fonction de l'occupation et des besoins en air de compensation, permettra de limiter les consommations d'énergie.

1.5 Les locaux accessibles au public

Dans ces locaux, il est nécessaire de maintenir un climat qui permet d'assurer le confort des visiteurs tout en maintenant pour les documents un niveau d'hygrométrie proche de celui des magasins.

1.5.1 La salle de lecture

C'est un lieu privilégié, ouvert au public, qui accueille les lecteurs venant consulter des documents originaux ou numérisés.

Cette salle est spacieuse, son architecture est plutôt orientée vers la recherche de lumière naturelle, en évitant toutefois l'éblouissement des lecteurs. Cet espace est souvent de grande hauteur et pourvu de surfaces vitrées importantes. Il doit être séparé des autres espaces par des portes à fermeture automatique.



Image 5. Salle de lecture des Archives de la ville et de l'Eurométropole de Strasbourg

Le calcul des charges doit prendre en compte :

- > les apports et les déperditions de l'enveloppe du bâti et plus particulièrement des fenêtres. À ce titre, il est conseillé de travailler avec la lumière du jour orientée au nord ou d'équiper les parois vitrées de stores et de pare-soleils extérieurs afin de combattre les apports par rayonnement solaire. L'isolation thermique doit être très performante ;
- > les apports des occupants (chaleur sensible et latente), afin que les installations soient dimensionnées en fonction de la capacité maximale de la salle ;
- > les dégagements calorifiques internes provenant des sources d'éclairage et des équipements informatiques et multimédia, dont il faudra faire l'inventaire ;
- > le renouvellement d'air qui sera fonction du nombre de lecteurs. Le règlement sanitaire départemental type précise qu'il faut, pour ce type d'activité, un débit d'air hygiénique de 25 m³/h par lecteur.

Les équipements de traitement d'air doivent permettre de maintenir des conditions climatiques proches de celles des magasins et être indépendants de ceux des autres espaces.

Pour tenir compte du confort des occupants, la température doit se situer entre 19 et 25 °C selon les saisons. Pour rester proche des conditions des magasins, l'hygrométrie doit être stable dans les limites de 40 à 60 %, en évitant toute variation brusque.

Suivant les résultats du calcul des charges, les installations doivent pouvoir assurer les fonctions de ventilation, de renouvellement d'air, de filtration (efficacité F7), de chauffage et de refroidissement. Les fonctions

d'humidification et de déshumidification seront indispensables d'autant plus que l'on introduit une quantité importante d'air extérieur en fonction du nombre de lecteurs.

Une gestion fine de l'introduction d'air hygiénique doit permettre d'optimiser les consommations d'énergie. À ce titre, il faudra prévoir la fermeture de l'air hygiénique durant les horaires de fermeture au public. En période d'ouverture au public, une adaptation du débit d'air hygiénique en fonction du nombre de lecteurs est conseillée.

1.5.2 La salle d'exposition



Image 6. Salle d'exposition aux Archives départementales de l'Ardèche

Les collections présentées en exposition temporaire proviennent :

- > soit de prêt de collections externes (bibliothèques, musées ou services d'archives). Les prêteurs ont souvent des exigences sur les conditions climatiques et souhaitent contrôler les enregistrements du climat des salles pour la période concernée, avant d'autoriser le ou les prêts de leur collection ;
- > soit des magasins de l'établissement concerné.

Il est important de maintenir des conditions climatiques assurant le confort du public tout en répondant aux exigences de la conservation des documents.

Dans un bâtiment d'archives, cet espace doit être dissocié du hall d'accueil. Des systèmes de fermeture des portes ou de sas permettront de limiter les perturbations climatiques provenant de locaux adjacents où l'air n'est pas traité.

Les équipements de traitement de l'ambiance des espaces d'exposition temporaire doivent permettre de maintenir des conditions climatiques répondant aux exigences de la conservation, en assurant les fonctions de ventilation, de renouvellement d'air, de filtration (efficacité F8), de chauffage, de refroidissement, d'humidification et de déshumidification.

Si l'on souhaite réaliser des expositions recevant des documents très fragiles, il sera alors indispensable de mettre en œuvre une installation de traitement d'air performante, assurant un maintien de l'hygrométrie à 50 % +/- 5 %. La température pourra être comprise entre 19 °C et 23 °C selon les saisons, mais l'amplitude journalière devra rester dans une fourchette de 1 °C.

Dans un contexte plus modeste, le maintien d'une HR entre 40 % et 60 %, associée à une vitrine étanche chargée de produits hygroscopiques (gel de silice ou autre) sera suffisant, à condition de maintenir une température stable entre 18 °C et 25 °C, en fonction des saisons. Ces produits hygroscopiques permettent d'améliorer la stabilité de l'HR et de limiter les variations brusques dues à des dysfonctionnements des installations CVC.

Le calcul des charges doit prendre en compte :

- > les apports et les déperditions. L'isolation thermique et l'étanchéité du bâti doivent être très performantes, les parois vitrées protégées par des stores extérieurs ou des pare-soleils afin de combattre les apports par rayonnement solaire ;
- > les apports des occupants (chaleur sensible et latente). Il faudra déterminer la capacité maximale de la salle. La norme incendie définit un taux d'occupation d'une personne pour 5 m². Ce ratio est généralement supérieur à la fréquentation des expositions : pour calculer les apports, un ratio de 1 personne pour 10 m² est certainement beaucoup plus proche de la réalité. Il est important de consulter les futurs utilisateurs afin de mieux cibler les objectifs de fréquentation. Un visiteur apporte 80 watts de chaleur sensible et 60 watts de chaleur latente (soit 140 watts de chaleur totale par visiteur) ;
- > les dégagements calorifiques internes provenant des sources d'éclairage et des équipements multimédia, dont il faudra faire l'inventaire. Il est préférable que l'éclairage muséographique soit réalisé à l'aide de LED de façon à limiter les apports de chaleur. Un ratio de 12 watts par m² est un seuil à ne pas dépasser ;
- > le renouvellement d'air qui sera fonction du nombre de visiteurs en période d'ouverture au public. Pour une salle d'exposition, le débit d'air hygiénique est de 25 m³/h par visiteur.

Une gestion fine de l'introduction d'air hygiénique doit permettre d'optimiser les consommations d'énergie.



Image 7. Salle de conférence aux Archives départementales de Seine-Maritime

1.5.3 La salle de conférence

Cet espace nécessite uniquement des conditions de confort pour les occupants. Il faut donc le chauffer et y renouveler l'air.

Suivant le résultat du calcul des charges et du nombre de places, il pourra être nécessaire de rafraîchir la salle. On fera alors appel à une climatisation de confort.

- > Le renouvellement d'air sera fonction du nombre de places prévu. Le débit d'air hygiénique est de 25 m³/h par personne.
- > Les températures peuvent être comprises entre 19 °C et 26 °C suivant les saisons.

Contrairement aux installations de traitement d'air avec contrôle d'hygrométrie, il est conseillé d'utiliser des systèmes de ventilation avec fonction free-cooling et d'équiper ces installations de récupérateurs d'énergie entre l'air rejeté et l'air neuf pour limiter les consommations d'énergie.

En dehors des périodes d'occupation, ces installations pourront être mises à l'arrêt. Une adaptation du débit d'air hygiénique en fonction du nombre de personnes présentes dans la salle est à prévoir conformément à la réglementation thermique.

1.6 Le déménagement des documents

Le déménagement est une phase d'opération très délicate, car au-delà des problèmes de manutention et de transport, les documents sont confrontés à des changements d'environnement climatique pouvant engendrer des désordres importants. Une opération de construction ou de rénovation d'un bâtiment d'archives peut durer plusieurs années et il faudra parfois stocker provisoirement les documents dans des lieux inadaptés, avec des climats mal contrôlés.

La phase la plus délicate correspond à celle du transfert des archives des magasins de stockage provisoire vers les futurs magasins de conservation. L'expérience montre que c'est souvent à la suite de ces transferts que des infestations sont apparues. Le plus étonnant est de constater que ces développements de moisissures se sont manifestés dans les nouveaux bâtiments, alors que les documents étaient auparavant conservés dans des conditions défavorables, parfois sans aucun traitement d'air.

Ce phénomène est essentiellement dû au caractère fortement hygroscopique des documents d'archives qui sont capables d'absorber et de désorber de très grandes quantités d'eau dans l'atmosphère lorsque les conditions thermohygro-métriques varient.

Dans les deux exemples développés au paragraphe 1.1.2, nous avons conclu qu'un « magasin type », équipé de rayonnages fixes, maintenu à 20 °C, 50 % HR, atteint son équilibre hydrique lorsque les archives contiennent 5 040 kg d'eau et l'air ambiant, 3 kg de vapeur d'eau.

Lorsque les documents proviennent d'un bâtiment non doté d'un système de régulation de la température et de l'HR, leur HRE peut être très différente. Au moment de leur transfert dans le magasin type :

- > si l'HRE des documents est plus élevée que l'HR du magasin, il y a tendance à la désorption. Ainsi, il suffirait que les archives rejettent 3 kg d'eau par heure, soit moins d'un millième de leur capacité hydrique, pour que l'ambiance du magasin atteigne la saturation (20 °C et 100 % HR). Cette valeur ne tient pas compte du renouvellement d'air et de la ventilation du magasin, ni des échanges avec les locaux adjacents ;
- > si l'HRE des documents est plus faible que l'HR du magasin, il y a tendance à l'adsorption. On aurait alors une faible quantité de vapeur d'eau dans l'ambiance du magasin qui serait adsorbée par les archives. Cela aura peu d'effet sur le court terme, car c'est le papier qui rééquilibrera le milieu ambiant ; sur le long terme, il suffirait d'humidifier régulièrement l'ambiance, pour remonter très lentement la teneur en eau des archives.

Le constat est sans appel et permet de confirmer que les risques majeurs de s'approcher du point de rosée dans l'ambiance du magasin et de créer des développements de moisissures sont réels lorsque l'on est en phase de désorption, c'est-à-dire lorsque les archives rejettent une très faible quantité d'eau. À l'inverse, la phase d'adsorption présente beaucoup moins de risques sur une courte durée.

Le choix de la période du transfert des archives est donc essentiel, d'où l'intérêt d'organiser le déménagement à la période durant laquelle la teneur en eau des documents est naturellement la plus faible. Si l'on tient compte du déphasage lié à l'inertie hydrique des fonds, c'est à la fin de l'hiver ou au début du printemps (mars / avril) que la teneur en eau des documents est normalement la plus faible.



Image 8. Le déménagement d'archives vers le bâtiment de Pierrefitte-sur-Seine des Archives nationales

Il n'est pas toujours aisé de choisir cette période, mais il est fortement conseillé d'en tenir compte lors de l'élaboration du planning de l'opération, car pour les autres périodes de l'année, avec des archives dont la teneur en eau est plus élevée que les conditions recherchées, il faudra faire appel à des équipements de déshumidification de forte puissance, associés à un brassage d'air important.

Se pose alors la question de savoir si les équipements de traitements d'air auront la capacité d'assurer cette déshumidification et combien de temps il faudra pour atteindre l'équilibre. En outre, le renouvellement d'air du magasin joue également un rôle déterminant.

L'exemple présenté ci-après est développé à l'Annexe II du présent document.

Dans cet exemple, l'objectif est de définir la quantité d'eau qu'il faut retirer à un magasin d'archives dans lequel ont été transférées 80 tonnes de documents préalablement conservées dans les conditions suivantes :

- > $T = 16\text{ °C}$, $HR = 65\%$;
 poids d'eau = $7,5\text{ g}_h/\text{kg}_{as}$,
 soit $HA = 8,52\text{ g}/\text{m}^3$;
 volume massique de l'air = $0,88\text{ m}^3/\text{kg}$.

Les conditions cibles de conservation dans le nouveau magasin sont les suivantes :

- > $T = 20\text{ °C}$; $HR = 50\%$;
 poids d'eau = $7,4\text{ g}_h/\text{kg}_{as}$;
 soit $HA = 8,31\text{ g}/\text{m}^3$;
 volume massique de l'air = $0,89\text{ m}^3/\text{kg}$.

Les collections passant de conditions fraîches et humides à des conditions plus chaudes et plus sèches, elles vont naturellement désorber de l'humidité pour se mettre en équilibre avec leur nouvel environnement. Ce sont donc environ 1 971 kg d'eau qu'il faudra retirer de l'air du magasin pour maintenir les conditions cibles.

À partir de trois scénarios de déshumidification, nous proposons d'effectuer une approche du temps nécessaire pour évacuer ces 1 971 kg d'eau :

Avec une déshumidification uniquement sur l'air neuf :

- > pour un taux de renouvellement d'air de 0,10 vol/h, il faudrait plus de 300 jours ;
- > pour un taux de renouvellement d'air de 0,30 vol/h, il faudrait un peu plus de 100 jours.

Nota : nous avons considéré arbitrairement que la capacité de déshumidification moyenne était de 5 g/kg d'air neuf.

Avec une déshumidification sur la totalité du débit de brassage (déshumidification sur l'air recyclé) :

- > pour un brassage de 3 vol/h (1 230 m³/h magasin plein), il faudrait environ 3 semaines ;
- > pour un brassage de 1,5 vol/h, il faudrait au minimum un mois et demi.

Nota : nous avons considéré arbitrairement que la capacité de déshumidification moyenne était de 3 g/kg d'air recyclé.

Avec une ventilation assurant un brassage d'air des magasins associée à des déshumidificateurs autonomes :

- > avec 2 déshydrateurs par magasin, d'une puissance unitaire de 2 kg par heure et fonctionnant 24 heures sur 24, il faudrait au moins 3 semaines.

Nota : rappelons qu'il s'agit d'appareils autonomes qui sont utilisés ponctuellement pour faire face à des situations critiques telles que des infestations de moisissures ou pour créer des abaissements drastiques de l'HR d'un magasin. Ils sont souvent en location pour la durée de l'opération « coup de poing » et génèrent des coûts élevés (comprenant l'installation, la location et l'entretien). Ils peuvent engendrer une élévation de la température.

Il est totalement illusoire de penser que les installations de traitement d'air vont pouvoir, lors de l'opération de déménagement, évacuer en quelques jours cette quantité d'eau en surplus.

Si l'emménagement des collections se fait dans un bâtiment neuf, on ne peut imposer aux concepteurs, bureau d'études et entreprise, de garantir des conditions climatiques optimales sur la période qui suit immédiatement celle de l'emménagement des collections. **La période de garantie de parfait achèvement devrait donc être étendue à une durée de 2 ans.**

Plusieurs stratégies sont possibles lors des opérations de déménagement :

- > l'idéal est bien évidemment d'attendre que les conditions de stockage initiales soient les plus proches possibles de celles des nouveaux magasins pour procéder au transfert des fonds. Cette solution implique un suivi très rigoureux du climat des magasins d'origine et des mesures d'HRE au cœur des documents à l'aide de psychromètres à sabre ;
- > organiser le déménagement à la période durant laquelle la teneur en eau des documents est naturellement la plus faible, généralement dans la période de mars/avril ;
- > déménager les collections en plusieurs fois, ce qui permet de limiter la puissance de déshumidification à mettre en jeu. Cette option risque de compliquer l'organisation du déménagement et d'alourdir son coût. De plus, lorsque le traitement d'air est commun à plusieurs magasins, il peut créer un déséquilibre climatique ;
- > utiliser les équipements de traitement d'air des nouveaux magasins, qui devront alors avoir une puissance suffisante pour évacuer l'eau en surplus. Cette solution ne va pas dans le sens des économies d'énergie que certains projets ont rendu prioritaires. Par contre, elle répond aux besoins climatiques extrêmes (déménagements, canicules, etc.) ;

- > renforcer les nouveaux équipements de traitement d'air en les complétant juste au moment du déménagement par des déshumidificateurs autonomes en location et ventiler fortement les magasins. Le coût supplémentaire est important pour des équipements en location, mais il permet toutefois de limiter le dimensionnement des équipements de traitement d'air fixes et, par la suite, leur consommation énergétique. Il est souhaitable que cette prestation soit prévue dans le budget initial de l'opération ;
- > enfin, le dernier scénario consisterait à laisser dériver la température du nouveau bâtiment et en particulier des magasins, l'air étant traité en hygrométrie, de sorte qu'elle se rapproche de celle du bâtiment d'où proviennent les collections. Une fois l'emménagement réalisé, la température pourra être augmentée de manière très lente.

1.7 Quelle puissance de déshumidification doit-on adopter ?

Les exemples développés dans le paragraphe précédent mettent en évidence l'importance de quantifier la puissance de déshumidification d'un système de traitement d'air de magasins d'archives, celui-ci étant totalement hors norme par rapport aux installations classiques.

Plusieurs alternatives sont néanmoins possibles, les conséquences économiques et les consommations d'énergie ayant généralement un impact décisif sur le choix des installations de traitement d'air.

- > Soit on choisit de réaliser une installation de déshumidification a minima (voir les Archives départementales du Nord et les Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon), avec le risque

de dériver au-delà des seuils des valeurs limites d'hygrométrie en cas d'emménagement de collections, panne du système de traitement d'air, épisodes de canicule ou de grand froid. Il faudra alors :

- faire appel à la location de déshumidificateurs afin de corriger les dérives,
- souffler de l'air instable, ce qui à long terme pourrait entraîner une dégradation des documents, et en particulier ceux se trouvant à proximité immédiate des bouches d'introduction d'air.

L'avantage de ces installations est de limiter les coûts d'investissement et surtout, de limiter les consommations d'énergie.

- > Soit on décide de réaliser des installations de traitement d'air dont la capacité de déshumidification sera maximale (voir les Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine et les Archives départementales de la Marne), c'est-à-dire capables de déshumidifier la totalité de l'air traité. Le résultat sera :

- une installation lourde, et un investissement important,
- des consommations d'énergie élevées,
- une capacité de déshumidification importante permettant de faire face aux dérives climatiques accidentelles, voire dans certaines conditions, à l'adaptation du climat lors de l'installation de documents,
- une meilleure répartition climatique aux différents points d'un magasin.

Ces deux scénarios représentent des solutions technique et financière très différentes et sont aussi tributaires de l'implantation géographique du site.

- > Une solution intermédiaire, consistant à ne traiter en hygrométrie qu'une partie de l'air recyclé et l'air neuf, permet de limiter les puissances à mettre en jeu lors des régimes de croisière et de disposer d'une capacité de déshumidification suf-

fisante pour contrer les besoins lors des transferts de collections et des périodes de climat extrême (canicule). Une CTA de recyclage reste nécessaire pour assurer le brassage des magasins.

- > Une autre solution consiste à traiter en hygrométrie un air neuf dont le débit est variable et peut atteindre 0,3 vol/h si les demandes de déshumidification sont fortes et de fonctionner à 0,10 vol/h en régime de croisière. Une CTA de recyclage reste nécessaire pour assurer le brassage des magasins.

Les concepteurs pourront, en fonction de la situation géographique des sites, déterminer les caractéristiques des installations à mettre en jeu, en utilisant comme support des « simulations thermiques dynamiques », qui s'appuient sur des calculs de simulation tenant compte des variations horaires des paramètres climatiques extérieurs, et des charges thermiques et hydriques intérieures (voir le paragraphe 2.4.3).

Chapitre 2

Aide à la conception climatique
du projet architectural

Lors de la réalisation d'un bâtiment d'archives, la prise en compte de la maîtrise climatique des magasins est un paramètre essentiel puisqu'il participe en premier lieu à la conservation des documents. Dans le cadre de l'élaboration d'un projet, la part dédiée à la gestion du climat n'est pas exclusivement réservée aux spécialistes des bureaux d'étude en génie climatique. Les autres acteurs du projet, maîtres d'ouvrage, utilisateurs (responsables d'établissement et de collections, restaurateurs...), maîtres d'œuvre (architectes, ingénieurs généralistes...), ont également un rôle essentiel à jouer.

Lors de la conception du projet de réhabilitation ou de construction d'un bâtiment d'archives, une des priorités sera l'obtention d'une inertie climatique la plus performante possible. Cela passe par la conception de l'enveloppe du bâti et le choix des matériaux la constituant, mais également par une parfaite répartition spatiale des fonctions devant être assurées à l'intérieur du site, c'est-à-dire « le zonage du bâtiment ».

2.1 Inertie climatique, notions fondamentales

Dans un projet architectural, l'inertie climatique d'un magasin d'archives résulte de la compilation des quatre facteurs suivants :

- > l'inertie thermique ;
- > l'inertie hydrique ;
- > l'isolation thermique ;
- > la compacité et l'architecture des constructions.

2.1.1 L'inertie thermique

Un matériau est dit en équilibre thermique lorsque sa température est constante et qu'il n'a pas d'échange de chaleur (rayonnement, conduction et convection) avec son environnement.

L'inertie thermique d'un matériau se caractérise par sa faculté à conserver, le plus longtemps possible, sa température d'origine lorsqu'il est sollicité par une perturbation thermique extérieure (ensoleillement, froid par exemple). Le matériau atteindra alors sa nouvelle température d'équilibre plus ou moins rapidement.

> Si le matériau est très inerte, il atteindra l'équilibre thermique lentement.

> A contrario, s'il est peu inerte, il l'atteindra rapidement.

L'inertie thermique se définit par le potentiel de stockage thermique d'un local. C'est la capacité d'un bâtiment à emmagasiner et à restituer de la chaleur ou de la fraîcheur. La propriété principale d'une construction à forte inertie (châteaux, bâtiments anciens) est de conserver une température stable et de se réchauffer ou de se refroidir très lentement, sous l'effet des variations du climat extérieur.

La température intérieure du bâtiment suit ces variations, mais avec :

- > un amortissement qui permet d'atténuer les effets de canicule ou de grands froids ;
- > un déphasage qui se traduit par un retard de l'effet de chaleur ; par exemple, c'est en fin de journée ou en soirée que la chaleur pénètre dans le bâtiment, alors que la température maximale extérieure se manifeste en milieu d'après-midi.

Par ailleurs, plus l'inertie thermique sera importante, plus l'amplitude de variation de la température ambiante d'un magasin d'archives sera faible.



Image 9. Archives départementales de l'Ardèche -
Architectes Soler & Gasseng - Extension en béton lors du chantier en 2010

Cette inertie thermique varie selon les quatre paramètres suivants :

- > l'épaisseur et la masse des matériaux constituant le bâti. Plus les matériaux sont denses, meilleure sera l'inertie thermique. Parmi les matériaux à très forte inertie, on trouve : la pierre, la brique réfractaire, le béton et la plupart des éléments en maçonnerie ;
- > la diffusivité thermique (D) du matériau (formule en Annexe I). C'est la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur à l'intérieur de son propre corps, de façon plus ou moins rapide ; elle représente sa tendance à la diffusion de la chaleur. Ainsi, plus la diffusivité thermique à l'intérieur d'un matériau sera faible, plus le transfert de chaleur sera long et meilleure en sera l'inertie thermique. Elle s'exprime en m^2/s ;
- > l'effusivité thermique (E) des parois du bâti (formule en Annexe I). Elle se caractérise par sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Plus la capacité d'un matériau à absorber ou restituer la chaleur (apports solaires par exemple) augmente, meilleure sera l'inertie thermique ; elle dépend directement de la conductibilité thermique du matériau. Elle s'exprime en $J/K.m^2.s$;
- > la conductibilité (ou conductivité) thermique (λ) est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors des transferts de chaleur par conduction. C'est la quantité de chaleur qui se propage entre deux surfaces, à travers un matériau, par conduction thermique, sous un gradient de température. Elle s'exprime en $watts/m.K$.

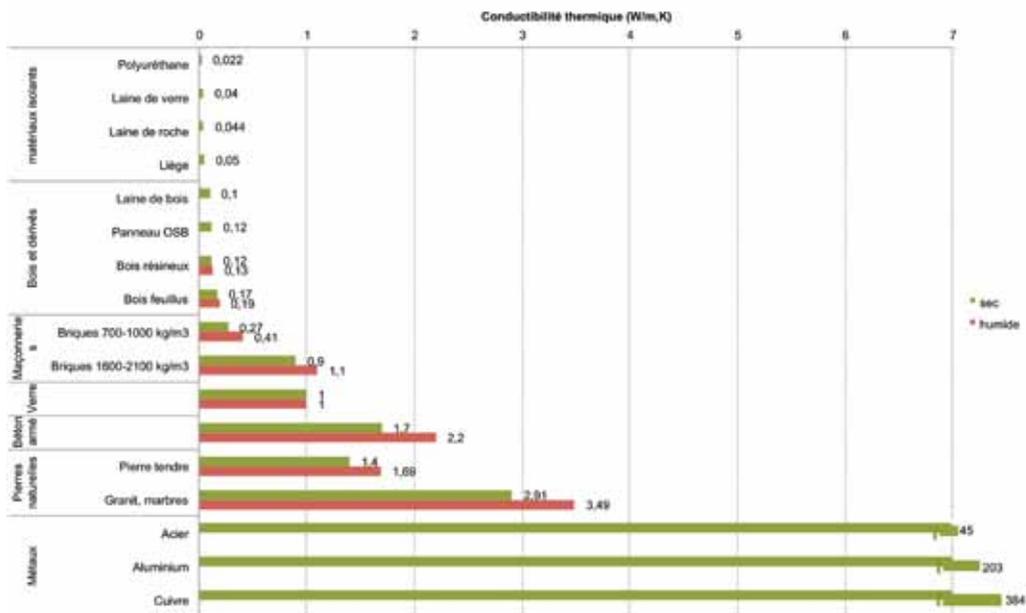


Figure 5. Coefficients de conductibilité thermique de quelques matériaux

Sur l'échelle de coefficients de conductibilité thermique (Figure 5) on constate que pour une même épaisseur :

- > le béton a une conductibilité thermique 60 fois plus importante que le polyuréthane ;
- > l'acier a une conductibilité thermique 45 fois plus importante que le verre.

2.1.2 L'inertie hydrique

L'inertie hydrique se définit comme étant la capacité d'un matériau à absorber (ou désorber) l'humidité et à amortir la variation de l'HR de l'air environnant.

Certains matériaux de construction ont la particularité de pouvoir stocker ou déstocker la vapeur d'eau ; ce phénomène dépend de leur nature et de leur porosité. Ils peuvent ainsi contribuer à stabiliser l'HR d'un local.

Les matériaux constituant les parois d'un local peuvent avoir une grande influence sur la stabilité de l'HR de l'air ambiant ; leur choix est donc prépondérant. Le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau du béton

de chanvre est par exemple particulièrement élevé, ce qui lui permet d'assurer une bonne régulation hydrique.

Il faudra toutefois toujours garder à l'esprit que dans un magasin d'archives, la capacité hydrique des matériaux du bâtiment est très inférieure à celle du papier ; en cas de variation de température, ce seront donc les collections qui contribueront en premier à réguler l'HR du local.

Nota : L'inertie hygrothermique est une compilation des inerties thermique et hydrique.

2.1.3 L'isolation thermique

L'isolation thermique permet de limiter les transferts de chaleur entre deux milieux de températures différentes. Elle représente l'enveloppe thermique qui protège un bâtiment du froid (hiver) et crée un rempart vis-à-vis des flux thermiques (déperditions en hiver et apports en été). Elle se caractérise par la conductibilité thermique du matériau (λ), et la résistance thermique (R). Plus

la conductibilité thermique du matériau isolant sera faible, meilleure sera l'isolation thermique.

Plus la résistance thermique de l'isolant R (qui tient compte de son épaisseur) est forte, meilleure est l'isolation thermique.

Elle constitue le paramètre essentiel pour lutter contre les consommations d'énergie.

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi U (ou anciennement K) caractérise la quantité de chaleur traversant une paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de ladite paroi. Le coefficient de transmission thermique s'exprime en $W/m^2.K$; il est l'inverse de la résistance thermique R. Plus sa valeur est faible et plus la construction sera isolée (formule en Annexe I).

Dans les magasins d'archives, l'isolation thermique permet également de se protéger contre les problèmes de condensation qui peuvent se produire à la surface interne des murs extérieurs par temps froid.

2.1.4 Compacité des constructions

Le choix de la volumétrie d'une construction aura une incidence aussi bien sur la consommation d'énergie que sur le coût de la construction.

La compacité (C) d'un bâtiment est le rapport entre le volume chauffé (V) et sa surface déperditive (A), c'est-à-dire la surface occupée par l'enveloppe extérieure du bâtiment. $C = V / A$

À volume et composition de parois identiques, la forme d'un bâtiment influe directement sur sa conductance thermique globale.

Plus la compacité sera importante, meilleure sera l'inertie climatique du bâtiment et plus la consommation d'énergie sera faible.

2.2 La construction et l'enveloppe du bâti

Parce que la fonction première d'un bâtiment d'archives est bien de conserver en parfait état les documents pour les générations futures, il faut, dès l'élaboration d'un projet :

- > introduire la notion de durabilité de l'ouvrage dans le choix des éléments constituant l'édifice et des procédés de construction à mettre en œuvre. On retrouve cet objectif dans la démarche HQE (voir paragraphe 2.4.4.) ;
- > souligner l'importance de l'adaptabilité de la construction à son environnement. En effet, l'orientation du bâtiment, son exposition au soleil, les influences des abords (plan d'eau, végétation, présence de source...) sont des préoccupations qui rejoignent également les points développés dans la cible 1 des démarches environnementales d'un projet HQE ;
- > ne jamais accepter de construire un centre d'archives sur un terrain implanté dans une zone inondable ou dans une zone sensible relevant d'un classement de sécurité type Seveso.

Le respect des règles d'incendie est évidemment incontournable et le projet doit répondre aux règles de sécurité énoncées dans le document établi par les Archives de France, intitulé *Règles de base pour la construction et l'aménagement d'un bâtiment d'archives*, 3^e révision d'octobre 2009, paragraphe 8, et par extension aux textes réglementaires en vigueur, à la date de réalisation de l'opération.

2.2.1 Comment améliorer l'inertie climatique ?

Lors de la construction d'un centre d'archives, l'inertie climatique d'un ensemble de magasins peut s'obtenir en respectant quelques conseils pratiques que la maîtrise d'œuvre pourra intégrer dans son projet.

Le choix des matériaux

L'inertie thermique étant meilleure lorsque les matériaux utilisés sont de masse importante et de forte épaisseur, on a tout intérêt à positionner la structure du bâti, béton, maçonnerie, à l'intérieur et en contact direct avec l'ambiance des magasins. En jouant le rôle de volant thermique, celle-ci amortira les variations de la température extérieure.

Aux Archives départementales des Yvelines par exemple, les murs intérieurs sont réalisés en briques creuses de terre cuite. Ils apportent une amélioration de l'isolation thermique des magasins.

Le choix des matériaux pour les murs des magasins doit également permettre de créer un tampon hydrique. Il est donc conseillé de sélectionner des matériaux isolants à forte capacité hydrique comme les complexes à base de végétaux (le chanvre, les isolants en panneaux rigides ou semi-rigides à base de fibres végétales, l'ouate de cellulose issue du papier recyclé). Les isolants traditionnels (polystyrène, polyuréthane, laine de verre, laine de roche...) n'ont pas ou peu de capacité hydrique.



Image 10. Archives départementales des Yvelines - mur intérieur en terre cuite d'un magasin

La peinture des magasins

Pour limiter la poussière émise par les matériaux des murs sans annihiler les avantages de leur capacité hydrique, on recherchera une peinture ayant une bonne perméabilité à la vapeur d'eau.

À la Bibliothèque nationale de France, des essais ont été effectués sur les murs en béton en vue de sélectionner une peinture perméable, dite « respirante ». Le rapport d'essai indique une perméabilité de $378 \text{ g/m}^2 \cdot 24\text{h}$ (classe V3, supérieure à $150 \text{ g/m}^2 \cdot 24\text{h}$). Il faut savoir que les valeurs les moins bonnes se situent à $15 \text{ g/m}^2 \cdot 24\text{h}$ (classe V1).

L'isolation thermique des murs

L'isolation thermique des parois extérieures doit répondre au minimum aux exigences Bbio de la RT 2012 (voir paragraphe 2.4.1), voire les dépasser, puisqu'elle doit compenser les consommations liées au traitement de l'hygrométrie.

On distingue deux types d'isolation :

L'isolation thermique par l'extérieur (ITE)

C'est le procédé d'isolation le plus efficace et il doit être privilégié pour tous les projets de construction neuve ou de réhabilitation d'un bâtiment d'archives, car il permet de :

- > supprimer les ponts thermiques au droit des planchers ;
- > conserver l'inertie hygrothermique apportée par la structure du bâtiment (maçonnerie des murs et des planchers) ;
- > conserver les surfaces intérieures lors de la réhabilitation de bâtiments existants.

Pour les bâtiments existants, le choix de l'ITE peut être soumis à des contraintes techniques de mise en œuvre inacceptables (aspect esthétique et coût financier), vis-à-vis des tableaux de fenêtres, des avancées de toitures ou des plaques de parement des façades existantes.



Image 11. Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon - architectes Gautier&Conquet et Dumetier - isolation thermique par l'extérieur en cours de montage

Dans tous les cas, elle nécessite un permis de construire et se trouve soumise à l'acceptation des instances administratives (notamment les Monuments Historiques et Bâtiments de France si le bâtiment est classé).

L'isolation thermique par l'intérieur (ITI)

L'ITI est incontournable dans les bâtiments dépourvus d'isolation (constructions des années 1960-1970) et dans lesquels on ne peut pas mettre en œuvre une ITE ; dans ce cas, l'ITI consiste généralement à réaliser des contre-cloisons intérieures en maçonnerie, afin de redonner un minimum d'inertie hygrothermique aux magasins.

Si l'on choisit de mettre en œuvre une ITI, il faut se donner comme cible un coefficient de transmission thermique des murs de $U \leq 0,28 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Pour les magasins d'archives dans lesquels le traitement de l'hygrométrie est primordial, l'ITI présente l'inconvénient d'être dépourvue de volant hydrique puisque les isolants thermiques ont pour la plupart une faible capacité hydrique.

Cette solution pénalise les surfaces utiles des magasins et a surtout pour effet de créer des charges au sol supplémentaires que la structure existante n'a pas toujours les moyens de supporter. Il faudra alors lancer une étude de structures qui pourra déboucher sur des travaux de renforcement des planchers, voire des fondations, ainsi qu'une modification éventuelle des rayonnages, entraînant des coûts financiers très importants.

Dans le cas d'un bâtiment classé à forte inertie, constitué de maçonnerie en pierres tendres de forte épaisseur (environ 0,80 m) dont le coefficient U moyen des parois se situe entre 1 et $1,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, la seule isolation possible pour améliorer la transmission thermique des murs est l'ITI.

On peut alors se poser la question de son efficacité, car la mise en œuvre d'isolants à l'intérieur des magasins annule le bénéfice de l'inertie hygrothermique et plus particulièrement la capacité hydrique très importante de la maçonnerie. Cette prestation risque d'entraîner une diminution de la stabilité de l'HR dans l'ambiance des magasins.

Pour certains projets de réhabilitation, il est préférable d'éviter de respecter trop strictement la réglementation RT ou de chercher à obtenir des labels qui seront très difficiles à atteindre, compte tenu de l'impossibilité, d'une part, de mettre en œuvre une « hyper isolation », et, d'autre part, de compenser la surconsommation d'énergie consécutive au traitement de l'hygrométrie.

L'isolation thermique des planchers et des plafonds dans les magasins

> Dans le cas d'un magasin en rez-de-chaussée, situé au-dessus d'un sous-sol ou d'un vide sanitaire, l'isolation thermique du plancher bas doit être renforcée. Son coefficient de transmission thermique U devra être inférieur à $0,28 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

> Les magasins du dernier étage ne sont idéalement pas situés directement sous la toiture terrasse : un niveau intermédiaire tampon permet de limiter l'incidence du climat extérieur, mais également les risques d'infiltration d'eau. S'il s'agit de combles, la dalle du dernier niveau des magasins doit être parfaitement isolée et le volume largement ventilé en été (la nuit par exemple), afin d'éviter d'avoir un matelas d'air chaud qui viendrait perturber le climat des magasins. En hiver, il est indispensable de maintenir une température suffisante pour éviter tout risque de condensation en plafond du magasin de l'étage inférieur.

- > Dans le cas d'une terrasse, le coefficient de transmission thermique devra être inférieur à $0,28 \text{ W/m}^2\text{C}$. Une terrasse végétalisée permet d'obtenir une très bonne inertie. Il faut toutefois prendre des précautions dans le choix de la végétation car les racines des arbustes peuvent s'étendre et dégrader le complexe d'étanchéité. Leur entretien régulier est indispensable.
- > Il n'est pas recommandé d'installer des locaux techniques de climatisation directement au-dessus des magasins. Toutefois, dans le cas contraire, ces locaux peuvent créer un espace tampon, à condition que la dalle séparant le magasin de l'étage inférieur soit parfaitement isolée thermiquement et dotée d'une véritable étanchéité. Les aménagements (trop-pleins, relevés, traversées de réseaux...) doivent être conçus de façon à ce qu'en cas de fuite intempestive, il n'y ait aucun risque d'infiltration d'eau en direction des magasins de l'étage inférieur.

Les baies vitrées

Dans les magasins, les baies vitrées doivent être en nombre très limité ; elles doivent être fixes.

Si elles permettent d'apporter une lumière naturelle pour le personnel travaillant dans les magasins, elles affaiblissent l'inertie climatique et constituent parfois une source de désordres car :

- > le coefficient de transmission thermique global des parois extérieures est réduit. Cela se traduit par une légère diminution de l'inertie climatique du magasin ;
- > une baie ne pourra pas assurer une étanchéité à l'air aussi efficace qu'une paroi dotée d'un isolant et d'un pare-vapeur ;
- > la lumière du jour est néfaste pour les collections ;
- > les risques d'infiltration d'eau ne sont pas négligeables.

Pour les magasins d'archives qui possèdent des ouvrants, (bâtiments des années 1960), constitués souvent de petites baies peu étanches, il convient :

- > soit de les remplacer par des châssis vitrés fixes isolants qui seront protégés contre les rayonnements infra-rouges (IR) et ultra-violet (UV) ;
- > soit de les condamner en les occultant par l'intérieur à l'aide de cloisons isolantes munies de pare-vapeur. Il ne faudra pas oublier de ventiler la lame d'air située entre la fenêtre existante et la nouvelle cloison.

Lorsque l'on remplace (ou condamne) ces fenêtres, il faut tenir compte :

- > des modifications de l'équilibre hygrothermique des magasins ;
- > de la suppression du renouvellement d'air naturel que ces ouvrants peu étanches apportaient dans les magasins existants. Il faudra alors la compenser par un traitement d'air adapté.

Les accès aux magasins

Dans les magasins, il faut éviter les portes donnant directement sur l'extérieur. Dans le cas des issues de secours, il faut créer des sas donnant sur des espaces qui ne sont pas en communication directe avec l'extérieur.

Lorsque des portes sont présentes, elles doivent être isolantes, et l'ensemble de l' huisserie doit répondre aux coefficients U_w de la RT 2012. Il doit en être de même pour les trappes de désenfumage qui doivent être isolées et munies de châssis à rupture de pont thermique.

2.2.2 L'étanchéité des bâtiments

Ce poste est très important car il a des incidences directes sur les consommations d'énergie et sur la conservation des fonds et des collections. En effet, plus on laissera entrer des quantités d'air extérieur importantes, plus la consommation énergétique sera élevée et plus on créera une instabilité de l'HR, en contradiction avec les objectifs de conservation.

Dans certains bâtiments anciens qui ne sont pas équipés de ventilation mécanique, le renouvellement d'air s'effectue par les joints des fenêtres sans aucun contrôle. Cela entraîne une instabilité de l'HR que l'on ne détecte pas systématiquement sur les enregistrements puisque ce sont en fait les documents d'archives qui, à leur détriment, assurent la régulation de l'HR des magasins. La logique d'une bonne gestion de l'énergie serait donc de rendre étanches toutes les huisseries. Mais la suppression de tout apport d'air par infiltration peut empêcher la « respiration naturelle des magasins » qui, en été, permet souvent de limiter les élévations de température. Apparaissent alors de nouveaux désordres climatiques nécessitant le recours à un rafraîchissement mécanique et une ventilation contrôlée (climatisation).

Il existe encore des magasins d'archives dans lesquels on n'a pas d'autre solution que d'ouvrir les fenêtres afin de limiter les dérives extrêmes du climat en été. Dans ce cas, en voulant apporter un minimum de confort, on risque d'introduire les désordres climatiques suivants :

- > une instabilité du climat et principalement de l'hygrométrie ;
- > la propagation de la pollution atmosphérique dans les zones urbaines ;
- > des risques de pénétration d'insectes et / ou de micro-organismes.

2.3 Quelques principes de répartition des espaces

Pour effectuer la meilleure répartition spatiale des espaces à partir des fonctions assurées dans un bâtiment d'archives (magasins, ateliers, salle de lecture, salle d'exposition, bureaux, etc.), on peut adopter quelques principes simples qui auront une incidence directe sur l'optimisation des conditions climatiques.

2.3.1 L'aménagement de couloirs autour des magasins

Comme nous l'avons précisé au paragraphe précédent, pour améliorer l'inertie climatique d'un magasin, l'une des options possibles consiste à éviter que les murs des magasins soient en contact direct avec l'extérieur. Ceci peut être rendu possible en aménageant des couloirs à leur périphérie, couloirs qui jouent le rôle de zone climatique tampon.

Les Archives départementales des Landes ont adopté cette configuration en aménageant les magasins dans une ancienne caserne. La partie externe en béton des parois des magasins se situe à l'intérieur du bâtiment, délimitant ainsi un espace technique d'environ 0,80 m entre les magasins et les façades du bâtiment qui sont classées (murs en pierre et fenêtres).

Le climat de ces couloirs devra être proche de celui des magasins, afin d'éviter de déstabiliser ce dernier à chaque ouverture de porte. Il est possible de l'isoler des autres espaces intérieurs du bâtiment d'archives (accès des collections, bureaux, ateliers, salle de tri...) grâce à un sas de communication.

La présence de quelques baies vitrées permettra d'améliorer les conditions de travail en apportant de la lumière naturelle. Celles-ci seront de préférence orientées vers le nord afin d'éviter les apports solaires.



Image 12. Archives départementales du Var
- architecte JP Clément - espace tampon formant
une circulation entre la façade vitrée et les magasins

2.3.2 Les magasins enterrés

Les magasins enterrés ont forcément une excellente inertie thermique et sont peu énergivores. Mais cet avantage ne doit pas faire oublier l'importance des risques d'inondation et d'infiltration d'eau, qu'il faudra évaluer :

- > une étude de l'environnement doit faire apparaître les risques potentiels d'inondation, de ruissellement d'eau ou de remontées capillaires et l'intensité des précipitations (orages exceptionnels). À la moindre incertitude, cette option doit être abandonnée. Il convient également de faire attention à la présence de nappe phréatique proche du lieu de la construction ;
- > la stabilité et la résistance du terrain doivent être validées par une étude du sol, compte-tenu de l'importance des charges générées par les documents d'archives ;
- > les murs périphériques de la construction enterrée devront être revêtus d'une étanchéité et d'un drainage surfacique réalisés suivant les règles de l'art en faisant attention à l'étanchéité des joints de dilatation. La construction d'un double mur périphérique avec vide d'air ventilé et visible permet de limiter les désordres ;
- > les magasins doivent être implantés de préférence en partie centrale du bâtiment enterré ; les couloirs de circulation et d'accès aux magasins, à la périphérie. Ces derniers jouent le rôle de tampon climatique et de zone de sécurité face aux risques d'infiltration d'eau ;
- > il faut éviter d'implanter des magasins au niveau inférieur, sachant qu'ils sont alors forcément plus exposés aux risques d'inondation ;

- > il est indispensable de réaliser une ou plusieurs stations de relevage des eaux, en doublant les pompes et les sécurités. Ces équipements doivent être alimentés par une source de courant de secours afin d'assurer la continuité du fonctionnement, en cas de coupure d'électricité ;
- > des détecteurs de présence d'eau au sol doivent être judicieusement répartis et associés à un système de report d'alarmes de première urgence qui sera dirigé vers un lieu de contrôle 24 heures sur 24.

2.3.3 Pour les locaux techniques de traitement d'air

Il convient de les regrouper, de manière à :

- > éviter des réseaux hydrauliques tentaculaires, qui de plus ne doivent en aucun cas cheminer dans les espaces recevant les documents ;
- > éviter des réseaux aérauliques trop longs, synonymes de surconsommation énergétique et de coût d'investissement élevé. En effet, de grandes longueurs de gaine créent des pertes de charge importantes qu'il faut pallier par une augmentation des puissances des moteurs des ventilateurs.

Une implantation satisfaisante consisterait à créer, en partie centrale du bâtiment, une ou plusieurs trémie(s) verticale(s) entresolée(s) et pourvue(s) de liaisons verticales, dans laquelle seraient installés les équipements de traitement d'air des magasins et les distributions verticales des réseaux hydrauliques et aérauliques. Cette centralisation facilite les opérations de maintenance et réduit les risques dus à l'eau ou au feu.

Il faut également prévoir des trappes d'accès largement dimensionnées pour le remplacement et la manutention du matériel.

Il est conseillé d'éviter l'implantation de réseaux aérauliques et de systèmes de traitement d'air en terrasse, non protégée des intempéries, car ils vieillissent mal (corrosion) ; cette implantation est souvent responsable de pannes ou de dysfonctionnements (humidité au niveau des composants électroniques). De plus, en terrasse, les équipements de régulation (sondes, capteurs...) sont exposés à des amplitudes importantes de température et d'humidité, qui peuvent créer des décalages entre les valeurs de point de consigne et les valeurs mesurées.

2.4 Les réglementations thermiques

Le développement durable a pris une place prépondérante dans la vie de nos concitoyens, avec pour principal objectif la protection de notre planète.

Cela s'est traduit par une prise de conscience des gestionnaires de patrimoines immobiliers et une stratégie immobilière mise en place lors du Grenelle de l'environnement. Cette stratégie intègre les différents échelons administratifs : État, régions, départements, collectivités locales.

Au cours de la dernière décennie sont parus de très nombreux textes de lois, décrets ou circulaires touchant le domaine de la gestion énergétique des bâtiments qui ont remis en cause les méthodes de calcul et les conceptions architecturales et techniques, tout en favorisant l'utilisation d'énergies renouvelables. La complexité des études techniques a fortement augmenté et les maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre et entreprises éprouvent parfois des difficultés à se repérer, d'autant que ces différents acteurs n'ont pas forcément les mêmes préoccupations, ni les mêmes objectifs.

Face à ces nouvelles réglementations qui abordent essentiellement les notions de confort et d'économie d'énergie, il est indispensable de rappeler aux intervenants que, dans un bâtiment d'archives, la priorité doit porter sur la conservation des documents d'archives.

Cette conservation passe avant tout par une gestion rigoureuse :

- > de la stabilité du climat (température et hygrométrie) ;
- > des limites de température et d'hygrométrie à ne pas dépasser ;
- > de la qualité de l'air.

Ceci n'est pas sans incidence sur les consommations d'énergie. Il sera évidemment plus difficile, voire impossible, d'atteindre les critères de performances affichés dans les réglementations, démarches et labels. C'est à ce titre que les espaces d'un bâtiment d'archives, dans lesquels on traite l'hygrométrie, sont en marge des démarches réglementaires habituelles.

2.4.1 La réglementation thermique RT 2012

L'État français a souhaité, par la RT 2012, renforcer les exigences de la RT 2005 en matière de consommation d'énergie primaire (Cep) et d'émission de gaz à effet de serre (GES) en imposant aux bâtiments neufs, une performance énergétique supérieure de 20%. Si les premières réglementations ciblaient les bâtiments d'habitation, elles concernent désormais également le secteur tertiaire.

Pour respecter la RT 2012, le projet doit faire l'objet d'une simulation à l'aide d'un logiciel certifié RT 2012 qui permettra de calculer les valeurs maximales des coefficients de référence à ne pas dépasser, lesquelles seront comparées à celles des coefficients du projet. Les paramètres évalués sont :

- > la consommation d'énergie primaire Cep qui prend en compte le chauffage, le refroidissement, les auxiliaires CVC, la production d'eau chaude sanitaire (ECS), l'éclairage et la ventilation. La Cep sera comparée à la Cepmax qui, dans la RT 2012 s'élève en moyenne à 50 kilowatts heure d'énergie primaire par mètre carré SHON et par an (kWh/m².an), mais dont la valeur est modulée suivant l'implantation géographique, l'altitude, le coefficient Bbio ainsi que la nature et la fonction du bâtiment. Pour obtenir un bilan définitif, il faut déduire les apports et les productions autonomes du site ;
- > l'émission de GES ;
- > les besoins bioclimatiques conventionnels Bbio exprimés en nombre de points. Le coefficient Bbio qui caractérise l'enveloppe du bâtiment (isolation, orientation, inertie, compacité, implantation géographique, altitude), doit être inférieur ou égal au Bbio max de référence (voir Figure 6). Il varie en fonction de la surface SHON RT du projet.

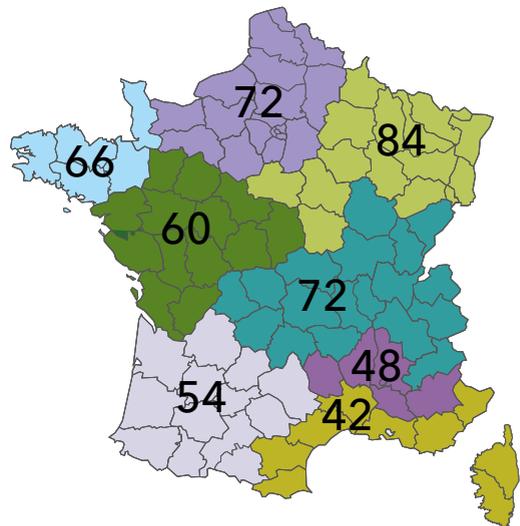


Figure 6. Coefficients Bbio maximum suivant les zones climatiques de la carte de France

2.4.2 Le diagnostic de performance énergétique (DPE)

Initialement mis en place pour les bâtiments d'habitation, le diagnostic de performance énergétique (DPE) s'applique désormais aux bâtiments publics.

Issu de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments de 2002, il définit un ratio illustrant la performance énergétique annuelle de tout ou partie d'un bâtiment, et son niveau d'émissions de gaz à effet de serre. Il permet ainsi de comparer le bilan énergétique et environnemental de différents bâtiments.

À l'issue d'un DPE, le maître d'ouvrage a l'obligation de réaliser un affichage informatif qui permette aux utilisateurs :

- > de mieux mesurer l'impact de leurs choix énergétiques sur l'effet de serre ;
- > d'avoir une estimation des factures énergétiques et de leur impact sur le budget de l'établissement.

Pour les bâtiments existants, le DPE permet de sensibiliser les gestionnaires qui doivent ainsi établir un suivi énergétique annuel de leur site.

L'affichage comporte deux étiquetages distincts :

- > l'un indique la consommation d'énergie primaire exprimée en kWh/m².an (Figure 7). Celle-ci correspond au cumul des consommations de chauffage, refroidissement, auxiliaires CVC, eau chaude sanitaire, éclairage, équipements divers (informatique, bureautique, audiovisuel...), duquel on déduira les apports internes et les productions autonomes de l'établissement ;
- > l'autre (Figure 8) indique l'émission de GES exprimée en kg équivalent de CO₂ par m² de SHON et par an (kg CO₂/m².an).

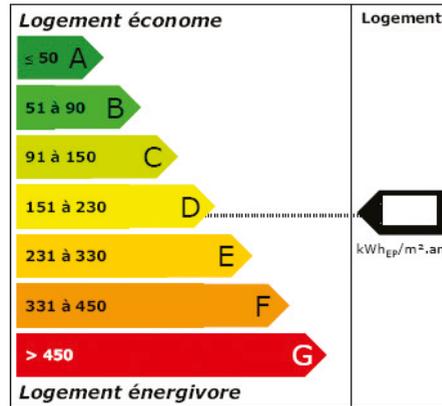


Figure 7. Étiquette énergie, indiquant la consommation d'énergie primaire exprimée en kWh/m².an

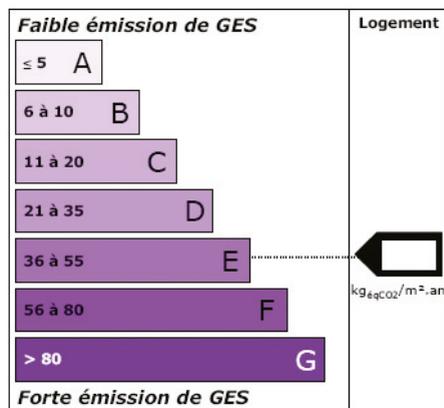


Figure 8. Étiquette climat, indiquant la quantité de gaz à effet de serre émise en kg CO₂/m².an

2.4.3 Les simulations thermiques dynamiques (STD)

Dans beaucoup de projets, on fait appel à des simulations thermiques dynamiques (STD) afin de calculer les consommations d'énergie et le dégagement de gaz à effet de serre d'un édifice.

En effet, les nouvelles constructions ayant des consommations d'énergie très faibles n'ont pas le même comportement que les bâtiments construits il y a quelques dizaines d'années. Il devient alors nécessaire de réaliser une modélisation précise afin d'optimiser la construction et les équipements climatiques (chauffage, ventilation et confort d'été).

Du fait de la très forte isolation thermique des nouveaux bâtiments, les apports internes (éclairage, multimédia, bureautique, informatique et occupants) ont un impact très important sur le climat par rapport aux apports externes (ponts thermiques, ensoleillement, étanchéité du bâti). Ces bâtiments peuvent être sujets à des surchauffes estivales et il faut alors veiller à minimiser ces différents apports internes. Si cela s'avère nécessaire, il faudra rechercher des solutions de rafraîchissement économiques.

Il est donc indispensable de déterminer en amont du projet les impacts de la conception architecturale sur les besoins en chauffage et en rafraîchissement ; les STD permettent d'atteindre cet objectif. Certains logiciels STD prennent également en compte les paramètres hygrométriques. Ceci peut être particulièrement intéressant pour les bâtiments d'archives.

Déroulement d'une STD

> À partir des plans du projet, les parois, ouvrants, planchers, toitures sont saisis en prenant en compte les surfaces, les maté-

riaux les constituant, les orientations et l'environnement extérieur.

- > On procède ensuite au découpage par zones thermiquement similaires en fonction de l'orientation, des heures d'occupation et du type d'activité dans chacune de ces zones.
- > Les portées d'ombre et les mitoyennetés sont prises en compte du fait de l'importance des apports sur le confort estival.
- > Les apports internes (occupation, éclairage, équipements) sont définis et intégrés aux bases de calcul.
- > Les conditions extérieures sont également intégrées aux bases de calcul à partir des données locales de Météo France (température, humidité relative, vents, ensoleillement).

Résultats et analyses

Plusieurs paramètres permettent de caractériser le comportement thermique du bâtiment, à savoir :

- > le bilan des zones permet d'appréhender les comportements thermiques en fonction du résultat des calculs des déperditions et des apports ;
- > les conditions de température et d'HR permettent d'apprécier le niveau de confort dans les différentes zones du bâtiment ;
- > les besoins en énergie (chauffage, rafraîchissement, humidification, déshumidification, ventilation) sont déterminés pour une année moyenne, à partir des données météorologiques ;
- > la présentation graphique des résultats par zones de bâtiment, en fonction des périodes d'occupation permet d'obtenir une synthèse du comportement climatique de l'édifice.

À terme, cela permet de situer les zones de bâtiment ayant des dérives de température en été et d'apporter une aide au choix des futurs équipements climatiques.

Simulation des équipements techniques

Certains logiciels sont capables de modéliser les systèmes de traitements climatiques traditionnels et de les coupler aux simulations du bâti.

Les nouvelles technologies tels que le solaire thermique, le photovoltaïque, la cogénération et les pompes à chaleur, peuvent être associées à ces modélisations.

Les nouveaux concepts architecturaux, tels que les puits canadiens, les façades pariéto-dynamiques, les terrasses et façades végétalisées, sont désormais intégrés dans les STD.

Simulation pour les bâtiments existants

Dans le cas de bâtiments anciens, on peut simuler divers scénarios en couplant l'enveloppe du bâti et les différents équipements techniques. L'objectif est de définir les solutions les mieux adaptées aux activités du site, en tenant compte des temps de retour sur investissement.

Simulation pour les bâtiments d'archives

La STD peut être appliquée pour les bâtiments d'archives existants, essentiellement pour l'enveloppe du bâti.

En revanche, le traitement de l'hygrométrie des magasins d'archives doit faire l'objet d'une étude spécifique prenant en compte les paramètres suivants :

- > le maintien d'un minimum de renouvellement d'air en régime stable ;
- > le brassage des différents locaux ;
- > le maintien d'une humidité relative stable ;
- > la stabilité de la température ;
- > la capacité hydrique des documents ;
- > la puissance de déshumidification pour les situations extrêmes (déménagement, canicule,...) ;
- > la nature des rayonnages (fixes ou mobiles).

2.4.4 Les bâtiments d'archives face aux réglementations thermiques

L'article 1 de la RT 2012 précise que cette réglementation ne s'applique pas :

- > aux bâtiments ou parties de bâtiment qui, en raison de contraintes spécifiques liées à leur usage, doivent garantir des conditions particulières de température, d'hygrométrie ou de qualité de l'air ;
- > aux bâtiments situés dans les départements d'outre-mer.

Ainsi, les espaces dans lesquels on traite l'hygrométrie, qui, dans un bâtiment d'archives, occupent pratiquement les trois quarts de sa surface, sont exclus de l'application stricte de la réglementation RT 2012 qui ne concerne donc que les bureaux, les locaux du personnel, les espaces d'accueil et les circulations, c'est-à-dire les espaces où l'on ne traite que le confort des personnes.

Cela n'autorise pas pour autant les acteurs d'un projet à négliger la démarche RT 2012 pour les espaces de conservation (magasins, salle de lecture, ateliers, salle d'exposition...). Bien au contraire, il convient de s'en préoccuper de façon encore plus rigoureuse, du fait de l'impact énergétique consécutif au traitement de l'hygrométrie. Cela passe par des études, des bilans préalables et des simulations climatiques.

En ce qui concerne le DPE, seuls les locaux où il n'y a pas de traitement de l'hygrométrie sont concernés : hall d'accueil, bureaux, locaux du personnel, salle de formation, salle de conférence, etc.

La création d'un bâtiment neuf

Pour une construction neuve, le maître d'ouvrage doit imposer, dès la programmation, l'application stricte de la RT 2012 pour la partie conception de l'enveloppe du bâti. Une isolation thermique par l'extérieur (ITE) associée à une étanchéité à l'air efficace est le moyen le mieux adapté pour atteindre la stabilité climatique recherchée. La mise en œuvre d'une ITE permettra de diminuer le dimensionnement des équipements de traitement d'air puisque les charges (déperditions et apports) seront alors réduites.

En tenant compte de son orientation, des surfaces vitrées, de l'altitude et des activités qui y sont exercées, le coefficient Bbio du bâtiment doit être inférieur ou égal au coefficient Bioclimatique conventionnel (Bbiomax).

S'agissant des surfaces vitrées, il faut retenir que la notion de surfaces des baies vitrées définie dans la RT 2012, qui conseille de limiter l'usage de l'éclairage artificiel au profit de l'éclairage naturel, ne présente pas de réel intérêt économique dans les magasins d'archives, car le temps d'occupation dans chacun de ces espaces reste très faible.

Si le maître d'ouvrage fait le choix de concevoir un bâtiment encore plus performant, il pourra alors :

- > se donner comme objectif de se rapprocher des labels BBC Effinergie ou BEPOS, labels appliqués aux bâtiments à énergie positive, qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment pour leur fonctionnement. Il devra alors imposer à la maîtrise d'œuvre de réaliser une hyperisolation dont le niveau sera supérieur de 20% au coefficient Bbio de la RT 2012, et d'effectuer des comparatifs de coûts (investissements, bilans énergétiques et temps de retour). Les bureaux d'étude technique en génie climatique devront sélectionner des équipements techniques

très économiques afin de compenser la surconsommation d'énergie due au traitement de l'hygrométrie. Cependant, il faut souligner que le débit de brassage d'air minimum dans les magasins entraîne une consommation électrique incompressible qui nous éloignera des cibles énergétiques ;

- > s'inspirer d'une démarche HQE (haute qualité environnementale) qui vise à améliorer le confort dans la construction, basée sur une approche du coût global d'un projet (environnemental et financier) depuis la conception jusqu'à la fin de vie des éléments constituant du bâti. Il imposera alors, en plus du coefficient Bbio, de concevoir des équipements techniques extrêmement performants qui permettront cette fois de compenser la surconsommation d'énergie consécutive au traitement de l'hygrométrie. Cette procédure implique un engagement sur les consommations d'énergie et sur les dégagements de gaz à effet de serre. L'apport de technologies plus pointues, comme les panneaux photovoltaïques, les énergies renouvelables, la biomasse et la cogénération seront nécessaires. C'est la procédure qui a été adoptée lors de la construction des nouveaux magasins des Archives départementales du Nord à Lille, projet présenté au paragraphe 5.5 du présent manuel.

Il faut toutefois que les maîtres d'ouvrage qui adoptent la procédure HQE puissent en assurer a posteriori une gestion et une maintenance très rigoureuses, faites par du personnel ayant une technicité reconnue dans le domaine de la gestion de l'hygrométrie et des nouvelles technologies.

La rénovation des bâtiments existants

La réhabilitation d'un bâtiment d'archives est bien évidemment plus délicate car la faisabilité d'une « hyper-isolation » est étroitement liée aux contraintes urbaines, voire historiques, de l'édifice.

Pour les bâtiments anciens dépourvus d'isolation et pour lesquels une ITE n'est pas envisageable, il convient de réaliser une isolation intérieure, et de se donner comme objectif minimum le niveau de performance défini dans la RT 2005 (voir glossaire en Annexe I).

Pour des bâtiments anciens à forte inertie, les difficultés de mise en œuvre d'une « hyper isolation » et la surconsommation consécutive au traitement de l'hygrométrie, ne permettront pas d'obtenir les performances réglementaires, et encore moins des labels.

La ventilation et la perméabilité des bâtiments

Ce poste est très important car il a des incidences directes sur les consommations d'énergie et sur la conservation des fonds. En effet, plus on fait entrer des quantités d'air extérieur importantes, plus la consommation énergétique est élevée et plus on crée une instabilité de l'HR en contradiction avec les objectifs de conservation.

Pour une construction neuve, il est souhaitable d'imposer en fin de chantier un test d'étanchéité qui permet de vérifier les fuites d'air du bâtiment, conformément aux exigences de la RT 2012. Ceci impose de réaliser un test d'infiltrométrie à la fin de la construction.

Pour les bâtiments anciens, la présence d'un pare-vapeur dans le complexe d'isolation thermique permettra de diminuer la perméabilité à l'air des parois extérieures et d'éviter les risques de condensation dans la masse. Pour les baies vitrées, il faut imposer leur remplacement par des huisseries ayant une classe d'étanchéité très performante ou, dans le cas contraire (classement de l'édifice), par une deuxième fenêtre intérieure.

Les bases de calcul pour le renouvellement d'air et le brassage d'air sont développées dans les paragraphes 1.3.1 et 1.3.2 du manuel pratique.

Chapitre 3

Gestion et maintenance
des bâtiments d'archives

3.1 Les niveaux de maintenance

Les chapitres précédents ont souligné l'importance du climat pour la conservation des documents d'archives et les risques que ces derniers encourent en cas de dysfonctionnement ou de mauvaise conception des systèmes de traitement d'air. Or les maîtres d'ouvrage ont souvent tendance à sous-estimer les prestations de gestion et de maintenance de ces systèmes qui sont pourtant incontournables et doivent permettre de répondre à certaines obligations :

- > la continuité du service, qui doit être assurée au bénéfice des usagers et des collections ;
- > le maintien des paramètres climatiques (T, HR et qualité de l'air) dans les conditions définies au chapitre 1 ;
- > l'optimisation des économies d'énergie et des coûts de fonctionnement ;
- > le respect de la réglementation relative à la sécurité incendie et à la sécurité des personnes.

L'entretien des équipements doit par ailleurs permettre une meilleure longévité des installations.

La norme européenne NF EN 13306 X 60-319 d'octobre 2010 définit la maintenance comme étant « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou en mesure d'assurer un service ou une fonction déterminée ».

La norme NF X 60-000 « Maintenance industrielle – Fonction maintenance » de mai 2002 définit les cinq niveaux de maintenance que l'on retrouve dans de nombreux documents sur la maintenance des installations en génie climatique.

1^{er} niveau de maintenance

Il s'agit des actions simples correspondant aux prestations de maintenance préventive ne nécessitant pas de moyens spécifiques

ni de niveau de compétence, telles que le nettoyage de filtres, les rondes de surveillance d'état, les manœuvres d'organes mécaniques, etc. Ce niveau peut également couvrir les premières interventions de la maintenance corrective telles que le remplacement d'éléments simples détériorés, de filtres usagés, etc.

2^e niveau de maintenance

Ce type d'intervention est effectué par du personnel qualifié, avec des procédures détaillées et des équipements définis dans les instructions de maintenance de chaque typologie de matériel. Il couvre les actions de maintenance préventive telles que le détartrage de surfaces accessibles, le contrôle des organes de coupure et de sécurité, des réglages simples et le contrôle des paramètres des équipements en fonctionnement. Ce niveau prend également en compte des prestations de maintenance corrective, telles que le remplacement par échange standard de composants usés ou détériorés.

3^e niveau de maintenance

Il s'agit d'opérations qui nécessitent des procédures complexes, effectuées par des techniciens qualifiés. En préventif, ce niveau couvre les prestations de contrôles et réglages complexes (régulation, brûleurs, test de combustion, etc.) et les relevés de paramètres techniques d'état des biens avec mesures. En correctif, il prend en compte les diagnostics d'équipements, les réparations de fuites, les reprises de calorifuge, le remplacement d'organes et de composants ainsi que les dépannages.

4^e niveau de maintenance

Ce niveau couvre les opérations nécessitant la maîtrise de techniques ou technologies particulières car il s'agit d'intervenir sur des organes spécifiques. Ce type d'intervention est effectué par un technicien qualifié ou une équipe spécialisée. En préventif, on trouve, par exemple, les révisions partielles

de la machine, la révision d'une pompe en atelier suite à une dépose préventive, etc. En correctif, ce niveau couvre, par exemple, la réparation d'une pompe sur site (ou en atelier) suite à un dysfonctionnement, le remplacement de clapets de compresseurs et les dépannages de forte complexité sur les régulations et les automates.

5^e niveau de maintenance

Il couvre les opérations de renouvellement ou de remplacement d'équipements hors service ou devenus obsolètes, effectuées par les constructeurs ou des entreprises d'installation. Par exemple, le remplacement d'une centrale de traitement d'air hors service, d'un compresseur de groupe frigorifique, d'un brûleur de chaudière, etc.

3.2 Le contexte des professionnels du génie climatique

Les domaines du génie climatique sont très diversifiés : ils s'étendent de la simple installation de chauffage par radiateurs aux systèmes de conditionnement d'air complexes, en passant par certains procédés industriels. Ces dernières années sont venues s'ajouter les installations utilisant de nouvelles technologies issues des énergies renouvelables.

Par ailleurs, il faut savoir qu'il existe de très nombreux systèmes de traitements climatiques autonomes ou centralisés et que, pour chaque élément d'une installation, il peut exister cinq à dix typologies de matériels différents, qui ont chacune un concept particulier.

Pour maîtriser ces techniques très diversifiées, il faut faire appel à plusieurs métiers :

- > les chauffagistes et thermiciens qui ont la compétence pour les interventions au niveau des réglages et de la conduite des installations de chauffage (maintenance

des chaufferies, des distributions hydrauliques et des émetteurs de chaleur) ;

- > les frigoristes qui interviennent sur les systèmes de production de froid autonomes et centralisés ;
- > les climaticiens qui doivent maîtriser tous les systèmes de traitement d'air et intégrer la gestion de l'hygrométrie ;
- > les électriciens, spécialistes des installations en génie climatique, qui interviennent sur les automatismes et les régulations (température, HR et pression) ;
- > les monteurs en chauffage et les plombiers, qui peuvent réparer ou modifier les parties hydrauliques des installations, mais également modifier les réseaux aérauliques ;
- > des programmeurs pour concevoir ou modifier les programmes des logiciels des automates.

Ceci permet de mieux comprendre les difficultés que peuvent rencontrer les professionnels du génie climatique face à la multiplicité des systèmes et des métiers. Le maître d'ouvrage devra parfaitement intégrer cette diversité s'il veut contrôler et maîtriser les prestations, notamment sur le long terme. Cela passe par le recrutement d'un professionnel du génie climatique au sein de la collectivité ou de l'établissement, ou par la sollicitation des services d'une assistance à la maîtrise d'ouvrage (AMO), spécialisée dans le domaine de la maintenance CVC.

Ainsi, pour les responsables de bâtiments d'archives, la difficulté est bien de s'entourer de professionnels ayant une parfaite maîtrise de la gestion de l'hygrométrie. Or, dans le secteur du génie climatique, la maîtrise de ce paramètre représente à peine cinq pour cent du marché, ce qui limite le nombre des spécialistes dotés d'un réel retour d'expérience.

3.3 Les marchés et les contrats de maintenance

Un contrat de maintenance d'installations en génie climatique d'un bâtiment d'archives doit être adapté aux objectifs climatiques à atteindre, ce qui implique que le maître d'ouvrage définisse parfaitement les besoins avant sa mise en place. A posteriori, il devra exercer des contrôles rigoureux lors du déroulement des prestations et un suivi systématique des différentes étapes de la maintenance.

La maintenance d'un grand site ne peut être gérée de la même façon que celle d'un petit ou moyen site. En effet, dans des bâtiments comme ceux des Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine ou dans le quadrilatère parisien, les marchés de maintenance prévoient la présence d'un ou plusieurs techniciens de maintenance, détachés à plein temps sur le site, et de spécialistes adaptés à la technicité des installations.

Pour des sites plus petits, ces techniciens assurent les passages hebdomadaires ou mensuels prévus au contrat, avec le risque de voir intervenir à chaque fois du personnel différent, n'ayant pas une bonne connaissance des installations et n'étant pas informé des problèmes spécifiques de la conservation. Ce type de situation est très fréquent dans les collectivités locales, au sein desquelles les bâtiments d'archives font souvent partie d'un marché de maintenance d'un parc de plusieurs dizaines de bâtiments (lycées, collèges, bureaux et centres administratifs, ateliers de maintenance, etc.) dans lesquels il n'y a généralement que des équipements de chauffage et quelques climatisations de confort. Les prestations de conduite et d'entretien sont réalisées par des techniciens chauffagistes qui n'ont pas forcément l'expérience de la gestion de l'hygrométrie.

Un contrat de maintenance de bâtiments d'archives doit donc être géré indépendamment des autres secteurs. On s'attachera à définir les spécificités et les objectifs climatiques à tenir, ainsi que les compétences du personnel technique appelé à intervenir.

Toutefois, au sein d'une même institution, il est conseillé de mutualiser les prestations de maintenance des bâtiments d'archives avec celles des musées et des bibliothèques, qui ont les mêmes contraintes de gestion de l'hygrométrie.

3.3.1 La maintenance préventive

Il s'agit des actions de maintenance qui permettent de réduire la probabilité de défaillance d'un des éléments constituant une installation, en anticipant un dysfonctionnement ou une panne.

On distingue deux types de maintenance préventive.

La maintenance préventive systématique

Elle est réalisée à partir d'un planning préventif que l'on retrouve sous la forme de « gammes de maintenance ». Ainsi, pour chaque élément constituant une installation, on trouve les types de prestations à assurer et leur fréquence.

Elle répond à différents critères, tels que :

- > la maintenance de ronde qui englobe les contrôles visuels et la surveillance du fonctionnement normal des équipements ;
- > la maintenance de premier et deuxième niveau ;
- > le remplacement périodique des pièces d'usure.

Ces prestations diminuent les risques de défaillance des installations : le coût financier qu'elles représentent est sans commune mesure avec les dépenses qui pourraient être générées par une infestation de moisissures dans des magasins d'archives.

La maintenance préventive conditionnelle

On intervient de plus en plus a posteriori, lorsque certains paramètres arrivent à un seuil limite. La maintenance préventive conditionnelle est appliquée lorsque des événements prédéfinis sont détectés (mesure d'usure, échauffement, auto diagnostic, informations communiquées par la GTB, etc.). Elle permet d'optimiser la maintenance préventive systématique.

Il convient de préciser que le personnel de maintenance doit être associé aux visites et contrôles réglementaires obligatoires réalisés par des bureaux de contrôle spécialisés et participer aux essais et aux épreuves test demandés par l'ingénieur du bureau de contrôle.

3.3.2 La maintenance corrective ou curative

Il s'agit des actions à engager lorsqu'un des éléments de l'installation climatique est défaillant.

On distingue différents types d'interventions, dont le dépannage de moyens de production, la réparation de fuites et le remplacement d'organes ou de composants par échange standard. Cette maintenance peut déboucher sur un diagnostic partiel des équipements qui pourra être suivi d'une prestation de gros entretien.

3.3.3 Le gros entretien renouvellement (GER)

Cette prestation que l'on désigne parfois par le terme de « garantie totale » prend en charge les remplacements de tout ou partie d'équipements défectueux, d'une certaine importance, nécessitant des travaux avec l'intervention d'équipes techniques.

Une liste des équipements concernés est établie lors de l'appel d'offres. Le maître d'ouvrage doit faire réaliser un état des lieux initial et, au terme du marché, faire réaliser par un expert un bilan des installations.

La prestation de GER ne peut être dissociée de la maintenance préventive et curative. La durée du contrat se situe en général entre 5 et 12 ans, avec une durée maximale de 16 ans.

3.3.4 La gestion des dépannages et des pièces détachées

Si l'on veut éviter les dysfonctionnements et les pannes dont la durée peut se prolonger plusieurs semaines avec pour conséquence des coûts financiers très lourds en cas d'infestations de moisissures, il est indispensable d'introduire dans les prestations du contrat de maintenance des critères d'efficacité.

Les dépannages

Les délais d'intervention et les types de dépannages doivent être définis dans le contrat. Il est par exemple possible de prévoir un délai inférieur à 24 heures en fonction du degré d'urgence, y compris la nuit, les jours fériés et le week-end, en prévoyant notamment des astreintes pour des mesures conservatoires. Il est à noter que les dépannages peuvent être à la charge du

prestataire et intégrés dans le prix forfaitaire, ce qui le motivera d'autant plus à effectuer correctement ses tâches de maintenance préventive. La fréquence des pannes peut être un des critères de jugement de l'efficacité de la société de maintenance et de ses intervenants.

Les pièces détachées

Il est de plus en plus fréquent de voir des fabricants annoncer des délais de plusieurs semaines pour le remplacement de tout ou partie des équipements. Une bonne gestion des pièces détachées permet d'éviter des délais trop longs de remise en service des installations. À ce titre, le prestataire doit établir une liste de matériel de première urgence, puis le fournir à l'institution qui le prend en charge. Le prestataire doit procéder au renouvellement systématique du matériel utilisé.

3.3.5 Les différents types de contrat

Dans le milieu professionnel, on utilise une classification des contrats de maintenance de type P1 à P3.

Le contrat P1

Il concerne la gestion et la fourniture d'énergie et peut prendre plusieurs formes :

- > MF ou marché forfaitaire, dans lequel la fourniture d'énergie est payée forfaitairement en régie, indépendamment des conditions climatiques ;
- > MT ou marché température, dans lequel le montant forfaitaire du P1 est corrigé en fonction des conditions climatiques ;
- > MC ou marché compteur. Ce marché est réglé en fonction de la quantité de chaleur fournie et mesurée par un comptage d'énergie. Il oblige le prestataire à maintenir un rendement optimum des installations et implique pour l'utilisateur une discipline dans l'utilisation de l'énergie.

Le contrat P2

Il concerne les prestations forfaitaires de maintenance préventive et corrective et couvre également la conduite et les dépannages des installations. Il engage le prestataire à maintenir les paramètres de fonctionnement prévus au cahier des charges (température, hygrométrie, etc.). Il peut être complété par des prestations de type P1 et P3.

La conduite des installations

Cette prestation consiste à régler les différents paramètres des régulations de température, d'HR, de pression et de délestage. Elle est assurée par les techniciens de maintenance, sous le contrôle des gestionnaires de bâtiments. Sur certains sites importants, lorsque l'institution dispose de personnel compétent, ce dernier peut en assurer la conduite. Lors d'audits ou d'expertises techniques, il est souvent constaté qu'une conduite inadaptée peut mener à des catastrophes. C'est sur la fonction essentielle de déshumidification, qui est énergivore dans son principe, que les incohérences sont généralement les plus nombreuses. Ce point est essentiel et doit être pris en charge par du personnel compétent et bien au fait des particularités des bâtiments d'archives.

Le contrat P3

Son objectif est de maintenir les performances des équipements dans le temps et d'assurer la pérennité des installations. Le cadre de ce contrat permet d'effectuer des diagnostics d'installations débouchant sur des actions de maintenance de niveaux 4 et 5 et sur des renouvellements d'équipements. Il couvre les prestations définies dans le cadre du GER. Le prestataire assure le remplacement ou la remise en état d'équipements à l'identique, en vue de maintenir les installations en état de fonctionnement.

Dans le cadre des contrats P3, il est possible d'introduire une clause d'intéressement financier sur la consommation d'énergie. Le contrat de performance énergétique est indexé à la maîtrise des consommations d'énergie, la garantie de résultat qui y est attachée est appliquée à travers la rémunération de la prestation P1, qui correspond à la facture d'énergie à la charge du prestataire. La clause d'intéressement consiste à partager entre le client et le prestataire les écarts du coût énergétique entre la consommation réelle sur une année dite de référence (n+1) et une consommation théorique fixée au contrat. Des formules permettent de calculer les bénéfices ou les pénalités à appliquer, en fonction des moyennes journalières des températures extérieures données par la météo locale (Degré Jour Unifié, DJU). Ces contrats sont alors appelés « marchés à intéressement du type PFI, MTI, ou MCI ».

Pour les bâtiments d'archives, la notion d'intéressement est à prendre avec prudence, car les calculs standards de consommation d'énergie dépendent des températures extérieures et ne prennent pas en compte les dépenses consécutives à la gestion de l'hygrométrie. En outre, le remplissage des magasins vides peut s'effectuer sur plusieurs années et l'énergie nécessaire pour déshumidifier ces magasins et les ramener aux bonnes conditions risque d'augmenter les consommations moyennes du bâtiment, perturbant ainsi les calculs d'intéressement. L'application de ce type de contrat peut éventuellement se faire en régime de croisière, lorsque tous les magasins sont pleins, et ne doit jamais perdre de vue l'obligation de résultats sur les conditions climatiques des espaces de conservation. Il faudra également introduire un correctif lié au traitement de l'hygrométrie. Enfin, l'année de référence doit être calculée sur la moyenne des consommations des deux ou trois dernières années de fonctionnement stable.

Les pénalités

Pour les grands établissements qui disposent de gestionnaires techniques, il est possible d'introduire des seuils de criticité dans les marchés de maintenance. Ainsi, on applique des formules pour calculer les pénalités qui peuvent correspondre à certains dysfonctionnements, comme la non-obtention des valeurs contractuelles de température et d'HR, de même que la fréquence de ces dépassements, les pannes et leur fréquence, les dépassements de consommation d'énergie.

3.4 Le suivi du climat dans les magasins

L'importance des conditions climatiques pour la bonne conservation des documents oblige à mettre en place une organisation efficace pour surveiller en permanence les variations climatiques dans les magasins.

Dans chaque bâtiment d'archives, il faut désigner une personne et un suppléant chargés de suivre plus particulièrement les évolutions climatiques des locaux abritant les fonds. Ils assurent le lien entre le service de la conservation préventive, les gestionnaires techniques de l'institution et les techniciens de maintenance des installations CVC. Ils déclenchent les actions d'urgence lors d'un constat d'infestation de moisissures. Ils doivent également assurer la gestion des systèmes d'enregistrement du climat.

3.4.1 La collaboration entre les responsables des collections et les techniciens de maintenance

Les installations de traitement d'air et les systèmes d'enregistrement du climat représentent un investissement de temps, de compétences et d'argent très importants. Les différents corps de métier doivent

mettre en place une organisation et des procédures débouchant, en cas de désordres climatiques, sur des actions préventives coordonnées.

C'est l'équipe de conservation des archives qui est responsable de la surveillance du climat dans les magasins et les espaces de traitement des documents. Elle doit assurer le suivi des conditions climatiques à l'aide des systèmes d'enregistrement du climat et déclencher, en cas de dysfonctionnement, les actions préventives.

Il convient d'instaurer des réunions périodiques, afin d'établir le bilan climatique du site en présence des différents intervenants : les équipes de conservation préventive de l'établissement, les responsables techniques de l'institution qui assurent le suivi et la gestion des contrats de maintenance et de l'énergie, les techniciens de maintenance chargés des installations CVC. Ces réunions doivent permettre d'établir un échange constructif entre des professionnels d'origines très différentes, n'ayant pas toujours la même approche des problèmes climatiques.

La première année de fonctionnement, les réunions peuvent être trimestrielles, voire mensuelles, en cas de déficience des installations. Ensuite, une réunion semestrielle peut suffire. Ces réunions devront porter sur les points suivants :

- > la synthèse des courbes d'enregistrement du climat accompagnée d'une analyse des dépassements de seuils (T, HR et HA) ;
- > l'inventaire des dysfonctionnements constatés (maintenance corrective et dépannages) ;
- > le suivi de l'avancement du planning de maintenance préventive ;
- > les améliorations pouvant être apportées sur les installations ;
- > le bilan des consommations d'énergie et les économies pouvant être envisagées,

sans remettre en cause les conditions de conservation dans les magasins ;

- > la mise au point d'un protocole d'intervention en cas d'infestation de moisissures.

C'est par un travail d'équipe entre les responsables des collections, les gestionnaires techniques et les techniciens de maintenance de la climatisation que l'on réussira à mettre en place une organisation efficace du suivi du climat.

3.4.2 Les capteurs enregistreurs de température et d'HR

Pour les magasins d'archives, l'utilisation de la GTB et de ses équipements de régulation (capteurs, sondes) pour le suivi du climat dans les magasins n'est pas suffisante. Il est en effet souhaitable que l'institution se dote de son propre système d'enregistrement du climat indépendant de la GTB. Ce système permettra d'obtenir et d'exploiter plus facilement des données et apportera des valeurs contradictoires lors des analyses climatiques. Les équipes en charge de la conservation disposeront également d'un système indépendant pour effectuer un suivi des espaces de traitement et de restauration.

On trouve, dans ce domaine, une très large gamme d'instruments de mesure dont certains sont mieux adaptés à la problématique des archives.

Le choix se portera notamment sur des capteurs de température et d'humidité pouvant réaliser des enregistrements sur de longues périodes. La capacité de mémoire peut atteindre plus de 100 000 valeurs et le pas de mesure peut être réglé entre 1 minute et 12 heures. Ils seront dotés d'un écran LCD pour l'affichage des valeurs mesurées, ce qui permettra aux agents de surveiller les éventuelles dérives climatiques. Un voyant

de signalisation de dépassement de seuil avec alarme sonore peut être une option intéressante pour déclencher localement une action préventive.

Le transfert des données vers le poste de gestion, dans lequel sera chargé le logiciel du système de mesure, peut s'effectuer :

- > soit manuellement, en déplaçant le capteur afin de transférer les valeurs sur un ordinateur. Si le nombre de capteurs est important, le temps de transfert sera long et les manipulations contraignantes ;
- > soit par une transmission filaire, dans ce cas, il est nécessaire de créer un réseau de câbles entre les capteurs et le concentrateur de données ;
- > soit par ondes radios, cette solution implique d'effectuer des tests in-situ, pour vérifier que les ondes radios passent correctement à l'intérieur du bâtiment. Des répéteurs intermédiaires sont souvent nécessaires entre les capteurs émetteurs et le concentrateur récepteur de données ;
- > soit par le réseau informatique interne, généralement le réseau Ethernet de l'établissement. Cela implique la nécessité de vérifier la compatibilité entre les différents organes de transfert de données.

Lors d'un déménagement, c'est au cœur-même des documents que l'on mesure le véritable bilan hydrique des archives. Pour cela, il peut être important de disposer d'un psychromètre à sabre, qui permet de mesurer ponctuellement l'HRE à l'intérieur des archives et de vérifier si elles sont en équilibre avec l'HR de l'ambiance du magasin.

En régime stable, il convient d'installer des capteurs enregistreurs de température et d'humidité relative dans chaque magasin d'archives et dans les locaux de traitement des documents. Les capteurs doivent être installés à des endroits judicieusement choisis ; on évitera par exemple la proximité des bouches de soufflage et des ouvrants.

3.4.3 L'analyse des enregistrements

Il est indispensable d'utiliser la représentation graphique pour effectuer le bilan climatique d'un site. Les courbes d'enregistrement doivent être stockées et classées par périodes calendaires et par locaux. Il est conseillé de les superposer avec les courbes du climat extérieur obtenues à partir d'un capteur extérieur disposé au nord et protégé de l'ensoleillement, afin d'analyser l'inertie du bâtiment et l'efficacité des systèmes de traitement d'air. Il est également conseillé d'afficher sur un même graphe les courbes de température et d'HR qui doivent normalement évoluer de manière opposée dès lors qu'il n'y a pas de régulation mécanique du climat (chauffage, déshumidification, etc.). Cette présentation permet de visualiser rapidement les problèmes pouvant notamment être liés à un dysfonctionnement des systèmes de traitement d'air.

Les nouvelles générations de matériel permettent d'effectuer des zooms sur des périodes données, de visualiser les seuils de limites hautes et basses de température et d'HR, d'éditer éventuellement des courbes de poids d'eau, d'envoyer des alarmes de dépassement de seuils, d'établir des histogrammes, d'effectuer des traitements statistiques des mesures. Il suffit de connecter l'enregistreur à un ordinateur pour générer un rapport avec toutes les données stockées.

3.5 La gestion technique de bâtiment (GTB)

Depuis quelques années, dans la plupart des opérations de construction de bâtiments, il est prévu la mise en place d'une gestion technique de bâtiment (GTB).

La gestion technique de bâtiment est un système informatique permettant de superviser un ensemble d'équipements techniques. Les gestionnaires techniques disposent ainsi d'un outil performant, capable de contrôler des installations importantes de CVC et de recueillir des données diverses, telles que :

- > des alarmes pouvant être classées par priorité (dépassement de seuils, dysfonctionnements, sécurité incendie, etc.) ;
- > des mesures de température, d'humidité relative, de pression, de temps de fonctionnement, etc. ;
- > des états de fonctionnement de tout ou partie d'équipements, de positionnement d'ouverture de vannes, de pourcentages de puissance, etc. ;
- > des éléments de comptage provenant des compteurs d'énergie.

Son architecture se compose des éléments suivants :

- > plusieurs automates, appelés unité technique locale (UTL), qui gèrent localement les différents équipements répartis dans le bâtiment ;
- > un poste informatique de gestion, équipé d'un logiciel de supervision et d'un concentrateur de données ;
- > un réseau filaire (bus de communication) reliant les automates au concentrateur de données (poste central) ;
- > les réseaux de communication internes (Ethernet, etc.) assurant les transferts de données.

Cet outil permet aux techniciens de maintenance d'établir des diagnostics pointus et facilite grandement leurs tâches.

Pour se familiariser avec les logiciels de gestion GTB, les techniciens de maintenance peuvent se référer à un document très important : l'analyse fonctionnelle des automatismes et de la régulation, qui permet de comprendre la logique de fonctionnement des différents équipements. Cette analyse, rédigée en texte clair par les concepteurs des installations, sert à créer les programmes des logiciels qui seront chargés dans les automates et les superviseurs. Elle définit les différents systèmes de régulation de chaque élément constituant les installations de chauffage, de production de froid, et de traitements d'air, ainsi que les automatismes des installations, tels que les asservissements, les délestages, les dérogations, les programmes temporels, etc. Sans cette analyse fonctionnelle, on ne peut pas comprendre le fonctionnement détaillé des équipements en génie climatique. On trouve fréquemment des techniciens de maintenance qui assurent la conduite d'installations sans en avoir pris connaissance. Ils se trouvent alors confrontés à des dysfonctionnements qui peuvent parfois être lourds de conséquences pour la conservation des archives.

La gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO) peut être également un outil d'aide à la maintenance pour les sites importants. Cette gestion impose à l'institution de disposer d'une structure technique avec du personnel qualifié. Cet outil permet d'assurer les fonctionnalités suivantes :

- > la gestion des équipements (inventaire détaillé du matériel, information technique, localisation, etc.) ;
- > la gestion de la maintenance (suivi du planning préventif, gestion et déroulement des tâches de la maintenance corrective, etc.) ;
- > la gestion de la sécurité (protocoles de mises à l'arrêt, sécurité incendie, sécurité des collections, etc.) ;
- > la gestion des pièces détachées et des interventions ;

- > la gestion du personnel de maintenance (fiches d'intervention, planning de charges, etc.).

3.6 Les stratégies de conduite des installations en cas d'infestation

Dès la conception, il convient de prévoir les procédures et les équipements qui seront nécessaires pour faciliter les interventions « coups de poing » lors d'infestations de moisissures dans un magasin.

Parmi ceux-ci, on peut citer :

- > l'installation d'organes d'isolement sur les réseaux aérauliques (registres ou clapets étanches), de façon à pouvoir isoler le magasin dans lequel les moisissures sont apparues et éviter ainsi de contaminer les autres magasins lorsque les installations sont communes à plusieurs espaces ;
- > l'organisation des réseaux aérauliques de façon à pouvoir extraire indépendamment l'air du magasin contaminé, et éviter ainsi tout risque de recyclage des moisissures vers d'autres locaux ;
- > la possibilité d'augmenter le renouvellement d'air du magasin concerné par l'infestation ; dans ce cas, la puissance du système de déshumidification doit être suffisante pour baisser l'HR de l'air neuf introduit en complément ;
- > la mise en œuvre de trappes de visite sur les réseaux aérauliques qui serviront aux opérations de dépoussiérage et de désinfection des réseaux aérauliques.

Lorsque l'on se trouve confronté à une apparition de moisissures sur des documents, il faut lancer une procédure d'urgence qui doit s'effectuer en plusieurs étapes.

Les mesures à court terme

- > La première mesure sera de remettre en fonctionnement les systèmes de traitement d'air afin de faire baisser le taux

d'hygrométrie et d'augmenter le renouvellement d'air, après avoir pris soin d'isoler les réseaux aérauliques du magasin infesté.

- > Si les installations sont dans l'incapacité d'assurer ces fonctions, il conviendra de se procurer des déshumidificateurs (ou des déshydrateurs) autonomes, associés à des ventilateurs portatifs.
- > Enfin, un suivi journalier de l'évolution du climat est évidemment indispensable (enregistrement de T et HR).

Les mesures à moyen terme

- > Il est indispensable de lancer une opération de dépoussiérage et de désinfection des réseaux aérauliques et des centrales de traitement d'air. Des sociétés spécialisées dans le domaine de l'hygiène sont habilitées à réaliser ce type de prestation ; on évitera de répandre des produits chimiques sur les fonds en occultant les bouches de soufflage et de reprise.
- > On peut être amené à aménager un espace pour le traitement des documents contaminés, dans lequel on aura mis en place des traitements d'air autonomes pour restituer les conditions environnementales préconisées.
- > Enfin, il sera nécessaire de faire établir un audit des installations de traitement d'air et du bâti, afin de mettre en place un programme d'amélioration ou de renouvellement des équipements de traitement d'air.

Les mesures à long terme

- > Établir un protocole de vérification des entrées (conditions de température et d'hygrométrie, historique des dégâts des eaux, polluants et présence de nuisibles), d'assèchement si nécessaire, et de dépoussiérage est à prévoir.
- > Aménager une zone de quarantaine afin d'éviter de faire entrer des documents qui pourraient être une nouvelle source de contamination.
- > Contrôler les tâches de maintenance,

telles que le nettoyage ou le remplacement des filtres, ainsi que l'inspection des réseaux aérauliques.

- > Réaliser de travaux d'amélioration du bâti et des équipements de traitement d'air.

Lorsque l'on choisit la solution d'un traitement d'air individualisé par magasin, on utilise des armoires de climatisation de précision (ACL) pour assurer les fonctions de filtration, chauffage, refroidissement, humidification, déshumidification et ventilation. Ce procédé est énergivore, mais il permet d'assurer une certaine sécurité en matière de conservation des documents. Il est particulièrement conseillé dans des sites où il n'y a que quelques magasins à traiter.

La sélection des équipements doit se faire de façon rigoureuse si l'on veut éviter certains déboires :

- > il faut éviter les ACL standards conçues pour le seul traitement des locaux informatiques, qui sont équipées d'automates fermés ;
- > ces armoires doivent être équipées de régulations ouvertes, modifiables et communicantes avec les systèmes centralisés ; elles doivent permettre une évolution automatique des points de consigne entre été et hiver ;
- > les sondes de température et d'HR doivent être installées dans l'ambiance des magasins, et non pas dans le plénum de reprise (voir glossaire) afin d'éviter l'influence de l'air neuf qui est très souvent raccordé sur ce plénum ;
- > il est conseillé de les installer dans des placards techniques donnant sur les circulations d'accès aux magasins, afin de faciliter les tâches de maintenance ;
- > la distribution de l'air doit se faire par un réseau aéraulique judicieusement implanté, de façon à assurer un brassage d'air efficace ;
- > il est nécessaire de choisir les options proposées par les fabricants, pour assurer une filtration efficace (niveau F7, voire F8) ;
- > les batteries d'eau glacée doivent avoir une surface d'échange suffisante pour assurer une déshumidification efficace. Un régime d'eau glacée de 0/5 °C est conseillé.

Chapitre 4

Systemes de régulation du climat,
quelques conseils pratiques

4.1 Gestion de l'hygrométrie

4.1.1 La production de froid

La production de froid est un élément essentiel, car en plus d'assurer le refroidissement de l'air lorsque cela s'avère nécessaire, sa fonction est d'en assurer la déshumidification. Il est donc important de sélectionner les bons systèmes et de les faire fonctionner correctement.

On trouve deux types de production de froid :

- > la production de froid à détente directe, qui utilise directement le fluide réfrigérant comme fluide caloporteur ;
- > les groupes de production d'eau glacée, qui utilisent l'eau comme fluide intermédiaire pour transmettre les frigorifiques jusqu'aux systèmes de traitement d'air.

Dans les bâtiments d'archives, pour le traitement d'air des magasins dans lesquels la précision de l'hygrométrie est recherchée, on privilégie les systèmes à production d'eau glacée, qui apportent une plus grande finesse des régulations (température et HR) et par suite, une meilleure stabilité du climat. Lorsque ces systèmes sont utilisés seuls, il est essentiel de sélectionner un régime de température d'eau glacée de 5/10 °C, afin d'obtenir une déshumidification efficace dans les magasins standards.

L'adoption d'un régime d'eau glacée plus élevé conduit à réduire l'efficacité de la déshumidification, sans qu'il y ait une baisse significative de la consommation d'énergie, objectif pourtant recherché au départ. Dans ce cas, en effet, l'hygrométrie des magasins de l'air peut rester longtemps supérieure au point de consigne si les conditions extérieures restent très humides ; la sonde d'hygrométrie ordonne alors une déshumidification permanente et la batterie froide

continue à fonctionner à 100 % de sa puissance. S'ensuit une baisse de la température du magasin qui enclenche le réchauffage en post-déshumidification. On refroidit et on réchauffe donc l'air à traiter sans résultat satisfaisant. Pire encore, l'HR peut dériver au-delà des seuils à risques.

On retiendra par ailleurs que même un régime de 5/10 °C ne suffit pas pour déshumidifier les magasins spéciaux (photographies, films, etc.) qui requièrent une faible température associée à une faible hygrométrie. Les groupes froids installés dans les enceintes climatiques ou les chambres froides sont donc généralement des systèmes à détente directe. On peut également avoir recours à des déshumidificateurs à adsorption en complément pour abaisser davantage l'HR du magasin. Il est à noter que ceux-ci peuvent également être utilisés seuls.

4.1.2 Le réchauffage en été

Cette contrainte est forcément difficile à accepter par les gestionnaires dans des périodes où les économies d'énergie sont une priorité, mais le réchauffage en post-déshumidification est souvent une fonction incontournable. Pour répondre aux demandes des régulations d'hygrométrie, il est nécessaire de maintenir en permanence le circuit des batteries de réchauffage en fonctionnement, y compris durant les périodes chaudes. Plusieurs cas d'infestations se sont développés par suite d'une augmentation de l'HR, due à l'absence de réchauffage en intersaison et en été.

Pour limiter les dérives de consommation d'énergie, on peut utiliser différentes sources de production de chaleur en demisaison et en été, telles que :

- > la récupération de chaleur dégagée par les condenseurs des machines frigorifiques, mais il faudra compenser les insuf-

- finances par une autre source de chaleur ;
- > le réchauffage solaire, mais là encore, il faudra compenser les insuffisances du rayonnement solaire par une autre source de chaleur ;
- > le réseau de chauffage provenant de la chaufferie centrale du site, dont il convient de créer un réseau indépendant pour alimenter les batteries de réchauffage. Ces équipements doivent être calculés pour un fonctionnement avec un régime à basse température ;
- > une production de chaleur thermodynamique indépendante, dédiée au réchauffage ;
- > une co-génération telle qu'utilisée aux Archives départementales du Nord (voir le paragraphe 5.5) ;
- > un réchauffage électrique d'appoint (batteries électriques dans les systèmes de traitement d'air) qui se substitue à la chaufferie centralisée lorsque les puissances requises sont faibles.

Pour éviter le réchauffage en post-déshumidification, il peut être possible de remplacer le déshumidificateur à condensation par un déshumidificateur à adsorption. Ce dernier nécessite toutefois le réchauffage de l'air de régénération et le refroidissement de l'air de soufflage (voir le paragraphe 4.1.3).

Dans le cas de conceptions nouvelles, lorsque la fonction de déshumidification est en totalité assurée par le traitement de l'air neuf, il est possible de se passer du réchauffage post-déshumidification. En effet, dans ce cas, l'air froid déshumidifié est mélangé sans réchauffage avec l'air recyclé qui se trouve à un niveau tempéré. L'économie réalisée est alors substantielle.

4.1.3 Les déshumidificateurs à adsorption

Principe

L'air du local à déshydrater est aspiré par un ventilateur, puis traverse une roue déshydratante chargée de particules solides à fort pouvoir de sorption (généralement du gel de silice). Après s'être délesté d'une partie de son humidité, l'air asséché est ensuite soufflé dans le local.

Un air de régénération est réchauffé puis soufflé dans le sens opposé à celui de l'air traité dans une zone distincte de la roue. Sous l'effet de la chaleur, les particules désorbent l'humidité qu'elles contiennent, laquelle est évacuée vers l'extérieur. Cette roue est motorisée et tourne très lentement afin d'assurer les cycles de fonctionnement, comme l'indique le schéma ci-dessous.

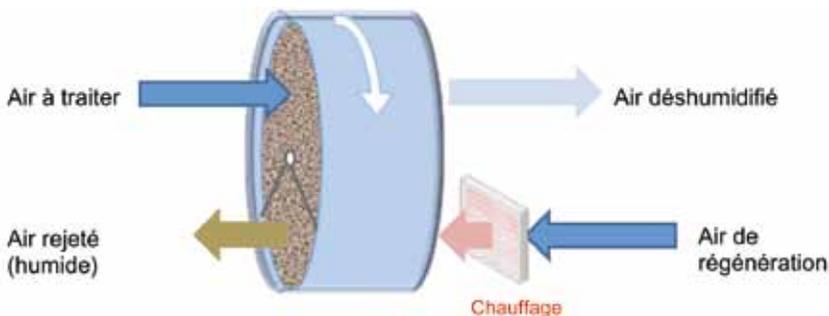


Figure 9. Schéma de principe d'un déshumidificateur à adsorption

Dans les bâtiments d'archives

Ces appareils peuvent être autonomes ou raccordés sur des réseaux aérauliques, ou encore associés aux centrales de traitement d'air en couplage avec un déshumidificateur à condensation par exemple. Ils permettent de faire baisser l'hygrométrie d'un magasin, lorsque le local à traiter est à basse température (enceinte climatique). Il est à noter toutefois que le réchauffage de l'air de régénération fait remonter la température de l'air du local qu'il traite. Il est donc souvent associé à un système de refroidissement.

4.1.4 Déshumidificateurs autonomes

Principe

Un déshumidificateur autonome est un appareil qui permet d'évacuer l'humidité contenue dans l'air d'un local.

L'air du magasin est aspiré par un ventilateur ; il est préalablement filtré, avant de traverser un évaporateur où il se refroidit en-deçà de la température du point de rosée, ce qui lui permet de se débarrasser de son

humidité sous forme de fines gouttelettes d'eau condensée. Cette eau est évacuée dans un réservoir ou, sur certains modèles, raccordée à une canalisation d'eau usée. L'air est ensuite réchauffé en traversant le condenseur du circuit frigorifique.

Le circuit frigorifique contient un fluide frigorigène et plusieurs composants :

- > un compresseur qui provoque la compression du fluide frigorigène ;
- > un condenseur où le fluide se condense et cède sa chaleur à l'air ;
- > un détendeur de pression ;
- > un évaporateur où le fluide s'évapore en absorbant la chaleur de l'air que l'on veut refroidir.

Ces appareils sont utilisés en dépannage dans les magasins d'archives ; ils permettent de faire baisser l'hygrométrie lorsque l'on se trouve face à une infestation de moisissures par exemple. Ils peuvent également contribuer à faire baisser l'HR lors des déménagements des archives, lorsque les installations de traitement d'air n'ont pas de puissance suffisante pour déshumidifier. Il est toutefois difficile de les recommander pour un usage permanent.

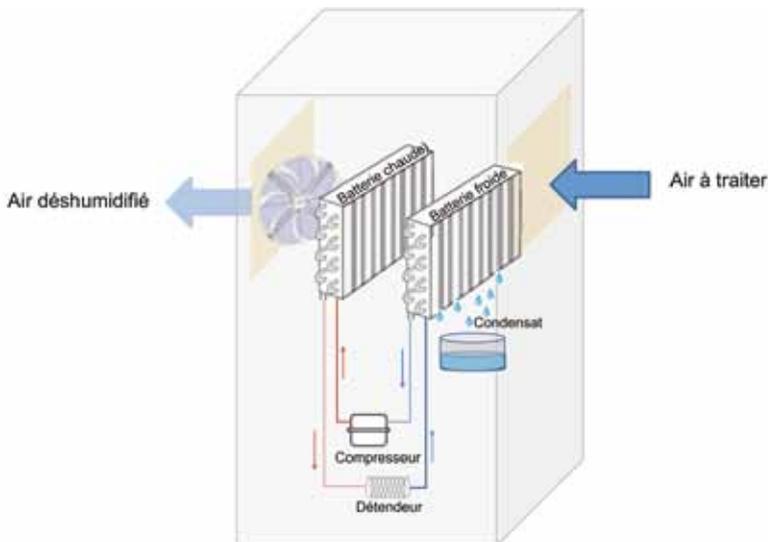


Figure 10. Schéma de principe d'un déshumidificateur autonome à condensation

4.2 Gestion de la température

Nombreux sont les installateurs qui, pour des raisons d'économie d'énergie, sont tentés d'appliquer aux bâtiments d'archives des solutions de traitement d'air qui trouvent aujourd'hui leur place dans les bâtiments d'habitation ou bâtiments du secteur tertiaire classique. Si l'intention est louable au départ, il faut bien insister sur le fait que ces solutions n'agissent le plus souvent que sur la température. L'hygrométrie n'étant pas gérée, elles ne permettent pas d'obtenir des conditions climatiques satisfaisantes pour les magasins d'archives.

4.2.1 Pompes à chaleur (PAC)

Principe

Une pompe à chaleur est un système thermodynamique permettant de transférer la chaleur d'un milieu, que l'on nomme source froide « émetteur », vers un autre milieu que l'on nomme source chaude « récepteur ».

Ce système peut être réversible et permet soit d'assurer le chauffage en hiver, en augmentant la température de la source chaude, soit d'assurer le rafraîchissement en été en abaissant la température de la source froide.

On trouve sur le marché des pompes à chaleur fonctionnant suivant différents procédés qui dépendent d'une part, du milieu dans lequel elles puisent les calories ou les frigories et d'autre part, du milieu dans lequel elles les évacuent. Le tableau 1 suivant présente les différents systèmes de PAC existants.

Pour le chauffage des bâtiments, on trouve différents principes :

- > les pompes à chaleur aérothermiques sur air extérieur ;
- > les pompes à chaleur géothermiques sur nappe phréatique ;
- > les pompes à chaleur sur étendue d'eau (rivière, fleuve, lac, étang, mer, etc.) ;
- > les pompes à chaleur sur capteur horizontal (grilles ou serpentins de tuyauteries enterrés sous environ 1 m de profondeur) ;
- > les pompes à chaleur sur capteur vertical (puits sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur).

Type de PAC	Milieu source de chaleur	Milieu de restitution
PAC Air/Air	Air (par exemple extérieur)	Air (par exemple intérieur)
PAC Air/Eau	Air (par exemple extérieur)	Eau (chauffage à eau chaude)
PAC Eau/Air	Eau (par exemple nappe phréatique)	Air (par exemple intérieur)
PAC Eau/Eau	Eau (par exemple nappe phréatique)	Eau (chauffage à eau chaude)
PAC Sol/Air	Terre (par exemple du jardin)	Air (par exemple intérieur)
PAC Sol/Eau	Terre (par exemple du jardin)	Eau (chauffage à eau chaude)

Tableau 1. Les différents types de pompes à chaleur

Dans les bâtiments d'archives

Pour le traitement de l'hygrométrie dans des magasins, on est appelé à produire simultanément du froid pour la déshumidification et du chaud pour le réchauffage en post-déshumidification. Or, les PAC traditionnelles assurent soit du chaud, soit du froid, et ne sont donc pas adaptées aux besoins.

Il faudra donc compléter le traitement de l'air avec une batterie chaude alimentée par une autre source chaude (électrique ou chaudières à eau chaude) ou la compléter par un déshumidificateur à adsorption, ce qui pénalisera globalement l'intérêt économique de la PAC.

Pour des sites importants, il existe des machines thermodynamiques de conception particulière qui peuvent assurer une production simultanée de chaud et de froid :

- > certains fabricants réalisent des équipements compacts sur mesure qui regroupent un système thermodynamique, produisant de l'eau chaude et de l'eau glacée, et une CTA qui prépare l'air neuf en température et en hygrométrie. Ce type d'équipement a été installé aux Archives nationales, à Pierrefitte-sur-Seine (voir le paragraphe 5.1) ;
- > les thermo-frigo-pompes sur eau sont des machines qui peuvent produire simultanément du chaud (régime d'eau chaude 40/50 °C) et du froid (régime d'eau glacée 6/10 °C). Ces équipements ont un intérêt économique lorsque les puissances à fournir sont importantes. Elles assurent la production de chaud et de froid des Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon (voir le paragraphe 5.3).

4.2.2 Le puits canadien (ou puits provençal)

Principe

Ce système est basé sur une ventilation naturelle et consiste, suivant les saisons, à réchauffer ou rafraîchir l'air avant qu'il ne pénètre dans un bâtiment en le faisant cheminer dans des tuyaux enterrés à environ 1,5 m de profondeur.

En hiver, la température du sol étant supérieure à celle de l'air extérieur, il préchauffe l'air entrant dans le bâtiment. En été, c'est l'inverse, et l'air qui chemine dans les canalisations enterrées tempère l'air chaud rentrant dans le bâtiment.

Il permet d'économiser l'énergie en hiver et peut, dans certains cas, limiter le recours à une climatisation de confort.

Dans les bâtiments d'archives

Ce système ne permet pas de traiter l'hygrométrie et le poids d'eau suit les variations de l'air extérieur. Ceci peut être problématique en hiver puisque l'air réchauffé va être introduit dans le bâtiment à une HR très faible. En été au contraire, l'air véhiculé dans le puits canadien puis introduit dans les magasins étant plus frais, son HR est plus élevée qu'à l'extérieur. Cette élévation peut atteindre des niveaux favorables à la germination puis la croissance des moisissures.

Ce système doit donc être complété par des équipements capables de traiter l'hygrométrie en assurant les fonctions d'humidification en hiver et de déshumidification en demi-saison et en été.

Les tuyaux enterrés peuvent également présenter des problèmes d'infiltration et de stagnation de l'eau de condensation favorables au développement des moisissures et des bactéries. Celles-ci, entraînées par le

courant d'air, sont transportées vers les magasins si le système est dépourvu d'une filtration efficace. Des puits canadiens ont été par exemple installés aux Archives départementales de la Haute-Marne à Chaumont et aux Archives départementales des Vosges.

4.2.3 Le chauffage solaire

Principe

Le chauffage solaire consiste à capter la chaleur produite par le rayonnement solaire. On distingue :

- > les systèmes passifs, dans lesquels la captation de la chaleur est assurée par l'effet de serre (rayonnement solaire sur des parois vitrées), mais également à l'aide de mur en maçonnerie appelés « murs capteurs » ;
- > les systèmes dynamiques, constitués de panneaux solaires, dans lesquels on utilise un fluide caloporteur pour transférer la chaleur depuis les panneaux jusqu'aux émetteurs de chaleur. Cette production dépendante de l'ensoleillement nécessite un stockage d'énergie (ballons tampons).

Dans les bâtiments d'archives

Pour les sites implantés dans le sud de la France, cette énergie renouvelable peut contribuer au réchauffage de l'air introduit dans les magasins, en post-déshumidification lors des demi-saisons et en été. Toutefois, comme sa production reste tributaire de l'ensoleillement, il faudra passer par un stockage thermique de grande capacité et l'associer à une production de chaleur complémentaire.

En Outre-Mer, le réchauffage en post-déshumidification étant nécessaire toute l'année, l'utilisation du réchauffage solaire est d'autant plus efficace.

4.2.4 Le chauffage ou le rafraîchissement par le sol

Principe

C'est un mode de chauffage ou de rafraîchissement par rayonnement, qui utilise la surface du sol d'un local pour le chauffer ou le refroidir.

Les nouveaux systèmes fonctionnant à basse température sont très confortables, contrairement aux anciens qui fonctionnaient avec une température surfacique du sol d'environ 35 °C et créaient un inconfort. Actuellement, la réglementation limite la température surfacique du sol à 28 °C.

On distingue deux systèmes :

- > le plancher chauffant électrique : un câble électrique chauffant (résistance électrique) assure le réchauffage du sol ;
- > le plancher chauffant à eau chaude : une tuyauterie en polyéthylène réticulé (PER) serpente dans la chape du plancher. Ce plancher peut devenir rafraîchissant, lorsque la tuyauterie est alimentée en eau glacée.

Dans les bâtiments d'archives

Il n'est pas conseillé de choisir ce type de chauffage pour chauffer ou refroidir les magasins, compte tenu de l'emprise au sol des rayonnages qui limite l'émission calorifique des serpents.

Ce système peut servir de chauffage de base pour les locaux où il n'y a pas de traitement de l'hygrométrie (bureaux, locaux du personnel et administratifs).

Chapitre 5

Étude de projets récents



Image 13. Bâtiment des Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine

5.1.1 Présentation du projet

C'est en 2004 que l'État a décidé de construire à Pierrefitte-sur-Seine un nouveau bâtiment pour abriter les Archives nationales.

Le ministère de la Culture et de la communication est le maître d'ouvrage de l'opération, l'OPPIC (Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la Culture) étant le maître d'ouvrage délégué. Le projet de l'architecte Massimiliano Fuksas a été retenu. Les études en génie climatique ont été menées par le bureau d'étude BETOM. L'entreprise générale Bouygues Bâtiment Île-de-France a assuré la réalisation des travaux.

Les travaux ont démarré en mai 2009, pour une livraison en juin 2012, avec une ouverture au public en janvier 2013.

L'édifice se compose de deux entités très contrastées :

- > le bâtiment de conservation abritant les magasins d'archives ainsi que les espaces de consultation, doté d'une très forte inertie ;
- > les six satellites répartis sur la longueur du bâtiment des magasins, abritant les espaces accessibles au public et aux scolaires, les salles de traitement des fonds, les ateliers de restauration, les bureaux de la conservation, ainsi que les locaux du personnel.

Des passerelles permettent d'assurer la liaison entre les différents espaces.

Pour la maîtrise du climat du bâtiment de conservation, l'objectif était de construire un bâtiment doté d'une très forte inertie thermique de façon à limiter l'usage de la climatisation pour le traitement d'air des magasins d'archives.

5.1.2 Le projet en quelques chiffres

Le bâtiment et ses magasins

- > La surface hors œuvre nette (SHON) est de 82 505 m².
- > La surface utile est de 62 048 m².
- > La surface des magasins est de 44 000 m² ce qui représente 71 % de la surface utile, soit au total 220 magasins qui se répartissent de la manière suivante :
 - 101 magasins à rayonnages mobiles,
 - 54 magasins à rayonnages fixes,
 - 11 magasins spéciaux,
 - 54 magasins à aménagement différé.
- > Le potentiel de rayonnement se situe entre 320 et 380 km linéaires.
- > Les six satellites représentent une surface d'environ 18 000 m².

Les équipements CVC

- > Conditions à maintenir dans les magasins standards :
 - température : entre 16 °C et 24 °C avec une variation maximum de 0,5 °C par jour et 2 °C par semaine,
 - HR : entre 40 % et 57 % avec une variation maximum de 1 % par jour et 5 % par semaine.
- > Puissance de la production de froid : 2 108 kW (984 kW pour les magasins et la salle de lecture et 1 124 kW pour le reste du bâtiment).
- > Puissance de la production de chaleur : 1 840 kW.
- > Débit de la CTA air neuf des magasins : variable de 5 000 à 9 000 m³/h.
- > Débit global des 9 CTA de recyclage : 194 880 m³/h, ce qui correspond à un brassage de 2 vol/h.
- > Puissance froide disponible pour la déshumidification de l'air neuf (CTA et PAC intégrée dans la machine de marque ETT) : 120 kW.
- > Puissance de réchauffage en post-déshumidification : 80 kW.

- > Puissance d'humidification des deux humidificateurs sur air neuf : 67 kg de vapeur par heure.
- > Renouvellement d'air : 0,10 vol/h, magasins pleins, ce qui représente un taux d'environ 0,07 vol/h magasins vides.

5.1.3 Description de l'enveloppe du bâtiment

À l'époque du projet, les objectifs adoptés en matière d'isolation thermique se situaient au niveau des exigences définies dans la RT 2005.

Le bâtiment de conservation comprend un rez-de-chaussée et dix étages, sans sous-sol (seulement une galerie technique), et se trouve classé dans la catégorie des immeubles de grande hauteur (IGH) en matière de sécurité incendie.

Malgré une volumétrie importante (longueur 163 m, largeur 47 m, hauteur 39 m), sa forme parallélépipédique lui confère une très bonne compacité. L'absence de baie vitrée donnant directement dans les magasins, associée à une structure en maçonnerie lourde (murs porteurs en béton de 0,30 m d'épaisseur) et une isolation extérieure (0,10 m de laine de roche), apportent aux magasins d'archives une excellente inertie thermique.

Ce bâtiment monolithique est habillé d'un bardage métallique en aluminium. La toiture terrasse est isolée par des panneaux de polyuréthane de 10 cm d'épaisseur avec une étanchéité autoprotégée.

Les six bâtiments satellites, contrairement au bâtiment de conservation, ont une faible inertie thermique. Il s'agit d'une structure métallique équipée de menuiseries alumi-

nium, à rupture de pont thermique, largement vitrées. Les terrasses des satellites sont isolées par des panneaux de polyuréthane de 10 cm d'épaisseur avec une étanchéité autoprotégée. Les planchers donnant sur l'extérieur sont isolés par 30 cm de laine de verre en sous-face.

5.1.4 Description technique du traitement d'air

La conception des équipements climatiques devait répondre aux contraintes de conservation définies dans le programme, tout en s'appuyant sur l'inertie thermique du bâtiment de conservation. La maîtrise des consommations d'énergie des magasins devait accompagner la conception de ce projet.



Image 14.

Vue aérienne des installations de traitement d'air implantées sur la terrasse du bâtiment

Production de chaleur

Celle-ci est distribuée à partir de la sous-station de chauffage alimentée par le réseau de chaleur de la ville de Saint-Denis. Des batteries électriques spécifiques sont installées pour les besoins de chauffage induits par la déshumidification hors saison de chauffe.

Production de froid

Celle-ci est assurée par quatre groupes de production d'eau glacée fonctionnant à un régime de 7/12 °C, avec la possibilité de descendre à 3/8 °C afin d'assurer la fonction de déshumidification avec les recycleurs d'air des magasins (CTA 01 à 09) en cas de nécessité.

Traitement de l'air neuf du bâtiment de conservation

Celui-ci est assuré par une unité de traitement d'air de marque ETT. Elle comprend deux parties :

- > une pompe à chaleur réversible air/eau et eau/air qui produit simultanément de l'eau glacée (régime 0/5 °C) et de l'eau chaude ;
- > une CTA qui assure la déshumidification et l'humidification de l'air neuf. Cette CTA fonctionne en débit variable, entre deux seuils limites de poids d'eau (entre 5 et 11 g_n/kg_{as}). Lorsque l'air extérieur dépasse ces seuils, la CTA est mise à l'arrêt.

Cette unité maintient un poids d'eau au soufflage (valeur de consigne), en assurant les fonctions d'humidification ou de déshumidification.

La déshumidification est autorisée lorsque le poids d'eau extérieur est supérieur de 0,30 g_n/kg_{as} au poids d'eau moyen des magasins, la valeur maximum à ne pas dépasser étant le poids d'eau correspondant à une HR de 57 % à la température moyenne des magasins.

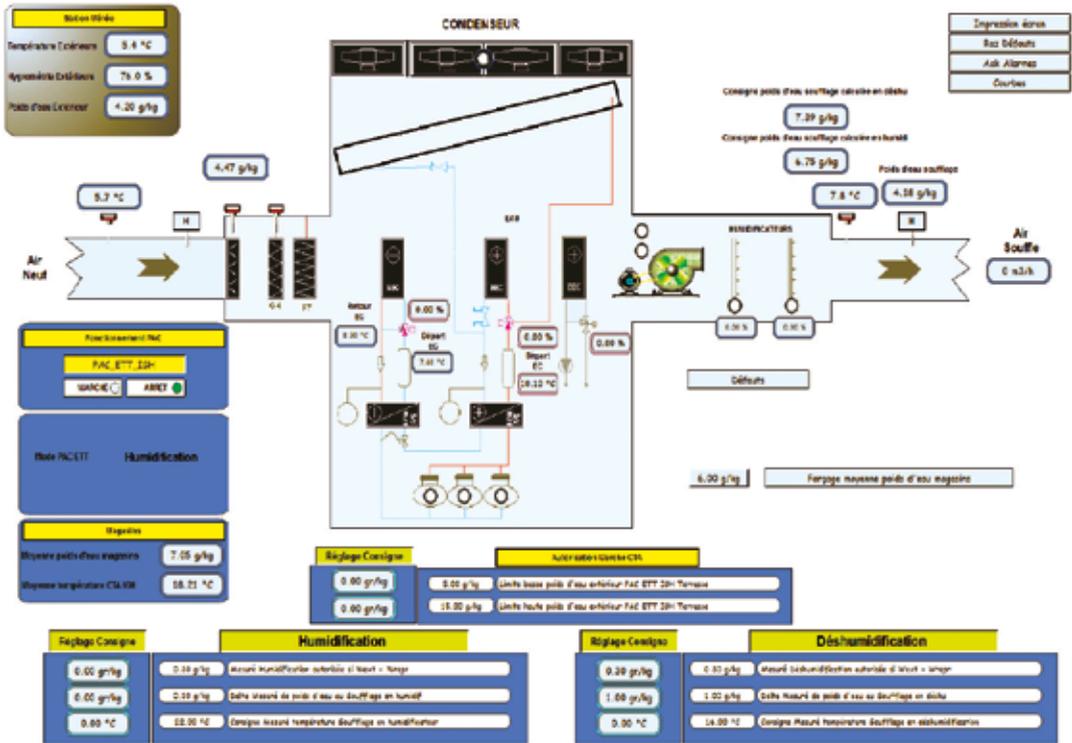


Figure 11. Schéma fonctionnel de l'unité de traitement d'air neuf

A l'inverse, l'humidification est sollicitée lorsque le poids d'eau extérieur est inférieur de $0,30 \text{ g}_n/\text{kg}_{\text{as}}$ au poids d'eau moyen des magasins, la valeur minimum au-dessous de laquelle il ne faut pas descendre étant le poids d'eau correspondant à une HR de 40 % à la température moyenne des magasins. L'algorithme de régulation est principalement conçu pour assurer de très faibles variations journalières de l'hygrométrie dans les magasins conformément à l'objectif initial du projet.

La température de soufflage en sortie de cette CTA est maintenue à la valeur moyenne mesurée dans les magasins, avec des limites basses et hautes de 16 °C et 24 °C respectivement. Le réchauffage en post-déshumidification, lorsqu'il est sollicité, est obtenu par action en cascade sur la batterie « condenseur de la PAC », puis sur la batterie chaude du circuit chauffage. En période estivale ce réchauffage n'est jamais utilisé. La limite basse de température de soufflage est baissée au niveau de la limite du point de rosée et le réchauffage est obtenu par mélange d'air dans les CTA dédiées au brassage. En effet, l'air neuf déshumidifié ne représente qu'environ 5 % du débit brassé. La déshumidification participe au rafraîchissement des magasins.

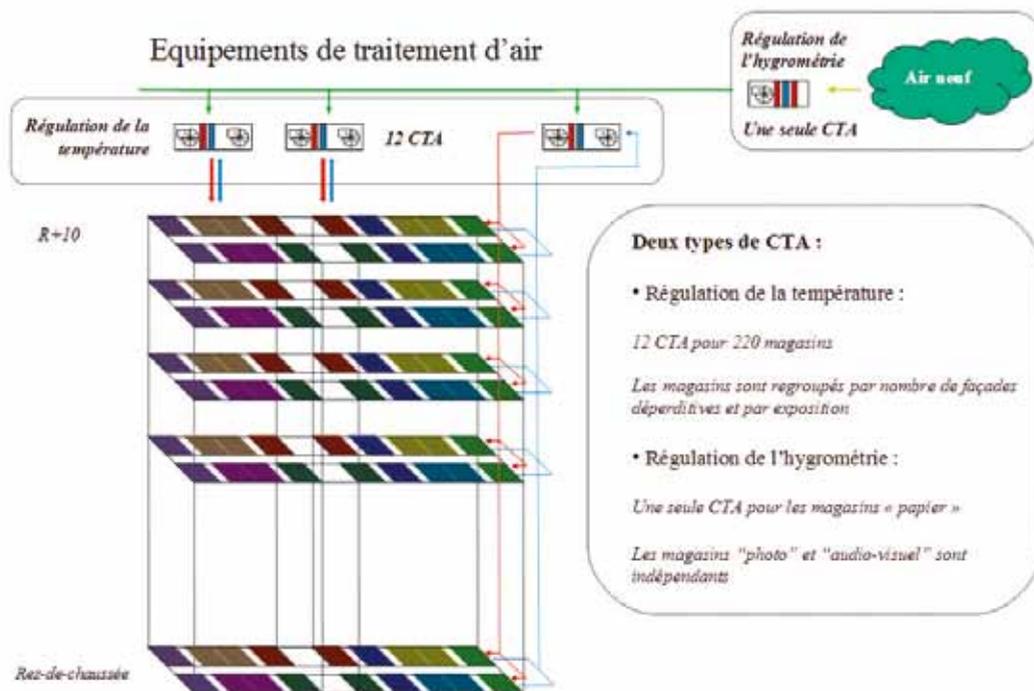


Figure 12. Schéma aéraulique du traitement d'air du bâtiment « magasins d'archives »

Distribution aéraulique

L'air neuf traité en poids d'eau dans l'unité ETT est distribué aux neuf CTA assurant le recyclage d'air des magasins. Pour chacune de ces CTA, l'introduction du débit d'air neuf dans le réseau de recyclage est gérée en fonction d'une régulation de pression, qui agit sur une boîte à débit variable (BDV). Elle permet d'équilibrer les pressions des réseaux lorsqu'il y a une variation du débit d'air neuf introduit dans les magasins. Si l'une des BDV se referme, suite à l'isolation d'un magasin, la régulation de la « CTA air neuf » enregistre une variation de pression et corrige le débit d'air dans le réseau de soufflage afin de fonctionner à pression constante.

Traitement de l'air des magasins

Neuf CTA dédiées au brassage alimentent chacune le traitement d'air d'une vingtaine de magasins répartis en deux colonnes verticales. Elles assurent les fonctions de ventilation, renouvellement d'air neuf, filtration, refroidissement, chauffage.

La conception de ces CTA permet d'assurer des fonctions particulières, telles que :

- > l'isolement et la sur-ventilation des magasins en cas d'infestation de moisissures, par un jeu de registres en entrée et en sortie des CTA.

- > Ces registres d'admission d'air, prévus pour la fonction sur-ventilation, sont pilotés manuellement. Chacun d'eux a été isolé par une tôle d'acier galvanisée, qui peut être facilement retirée en cas d'infestation ;
- > une déshumidification complémentaire en cas d'élévation anormale de l'hygrométrie suite à un climat extrême, à un sinistre, ou lors d'un déménagement. Dans cette configuration, la température de production d'eau glacée peut être abaissée à un régime de 3/8 °C. Cette possibilité n'a plus été utilisée depuis que les installations se sont stabilisées.

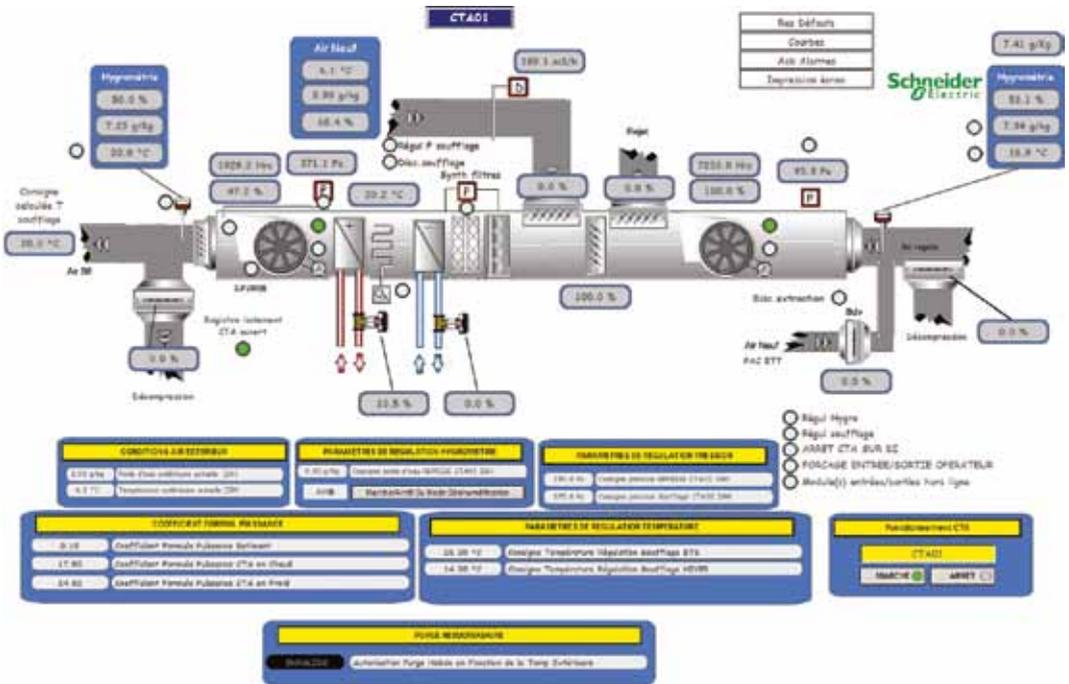


Figure 13. Schéma fonctionnel d'une CTA dédiée au brassage



Image 15. Vue d'une gaine de diffusion à très haute induction et d'une grille de reprise d'air

Diffusion et brassage de l'air dans les magasins

Le brassage adopté est de 1,5 vol/h au lieu des 3 habituellement conseillés pour les magasins d'archives. Les CTA et les gaines ont été dimensionnés pour du 2 vol/h.

Dès janvier 2015, le brassage a été réglé à 1,1 vol/h, engendrant des économies d'électricité. Cette diminution a été possible grâce à l'utilisation de gaines de diffusion d'air perforées à très haute induction, qui permettent d'assurer un mouvement d'air ambiant homogène et de brasser au maximum les espaces d'un magasin.

Cette gaine est implantée en plafond, au-dessus de la circulation distribuant les couloirs entre les rayonnages. La reprise d'air est implantée à l'opposé, dans l'angle du magasin. La hauteur moyenne sous plafond des magasins (2,90 m) a permis d'adopter ce procédé de diffusion d'air.

Traitement d'air des magasins spéciaux

Les magasins de conservation des documents spéciaux (chambres froides pour les photographies et les films) sont traités par des armoires de climatisation à détente directe associées à des déshumidificateurs à adsorption. Les magasins audiovisuels (conservation des bandes magnétiques, des supports optiques et numériques) sont traités par des armoires de climatisation à eau glacée associées à des déshumidificateurs à adsorption.

A l'origine, le renouvellement d'air dans les chambres froides n'était pas prévu, ce qui a eu pour conséquence de créer une concentration de gaz polluants générant dans certains cas des odeurs. Ce problème a été corrigé depuis, avec l'ajout d'air neuf et la mise en place de filtres à charbon actif spécifiques sur l'air recyclé.

5.1.5 Les conditions climatiques des magasins

Le suivi des conditions climatiques dans les magasins est assuré par un équipement de capteurs indépendants des installations CVC et géré par le personnel des archives.

Par ailleurs, les spécialistes CVC ont à leur disposition les enregistrements des capteurs de température et d'HR des régulations, dont les valeurs sont stockées via la GTB du site.

Pour chaque local, les valeurs de température, de poids d'eau et d'HR sont stockées et l'édition de courbes d'enregistrement permet de suivre l'évolution climatique des magasins.

Simulation

Lors de la conception, une simulation théorique de l'évolution annuelle du poids d'eau recherché dans l'ambiance des magasins, en fonction de celui de l'air extérieur, a été reproduite suivant le graphe ci-dessous

(Figure 14). Les courbes situées en partie basse de ce graphique donnent une indication sur les puissances appelées : en bleu, c'est la déshumidification qui est sollicitée le plus souvent de mars à octobre ; a contrario, c'est la fonction humidification qui est sollicitée le reste de l'année (courbe rouge). Les points roses représentent les valeurs annuelles du poids d'eau de l'air extérieur (relevés météo de la station la plus proche). On constate une très grande variabilité, avec des valeurs atteignant en janvier $2 \text{ g}_h/\text{kg}_{\text{as}}$ et des valeurs supérieures à $12 \text{ g}_h/\text{kg}_{\text{as}}$ en été. La courbe bleue représente la simulation théorique du poids d'eau devant être atteint dans l'ambiance des magasins, et cela grâce à la régulation au soufflage. Celui-ci devra se maintenir entre $5,6 \text{ g}_h/\text{kg}_{\text{as}}$ en janvier, et $9,3 \text{ g}_h/\text{kg}_{\text{as}}$ en août, tout en respectant les exigences de température et d'HR de l'ambiance des magasins. La courbe théorique recherchée (courbe bleue) suit les tendances annuelles des conditions extérieures (en rose). Cela permettra de réduire l'amplitude entre l'extérieur et l'intérieur et par conséquent, de diminuer de façon importante les consommations d'énergie.

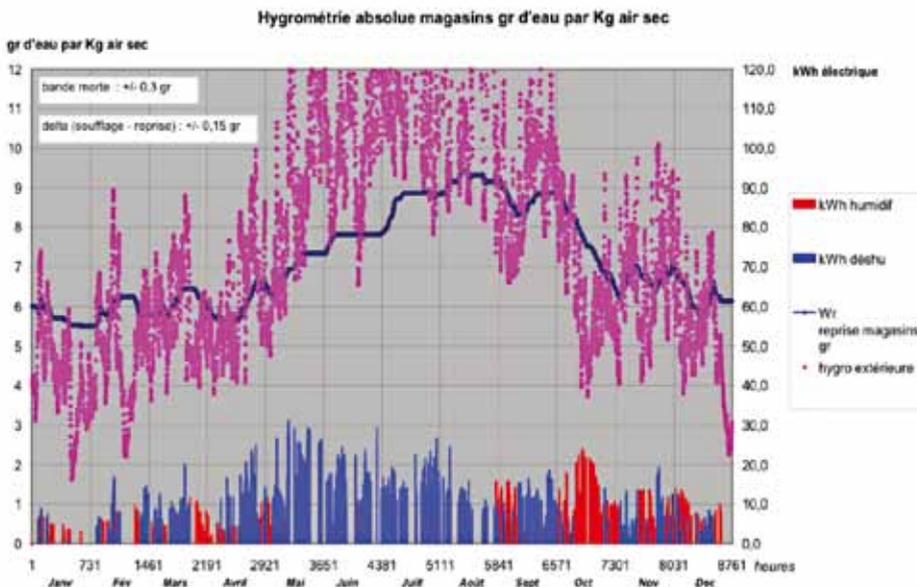


Figure 14. Simulation théorique de l'évolution annuelle du poids d'eau recherché dans l'ambiance des magasins, en fonction de celui de l'air extérieur

Courbes d'enregistrement du climat d'un magasin

Les enregistrements effectués dans un magasin représentatif, le magasin 505 (Figure 18), nous montrent que l'évolution du poids d'eau est très proche de celle prévue dans la simulation théorique.

La température du magasin 505 évolue très régulièrement entre les seuils limites de 16 °C en hiver et 24 °C en été (Figure 15). L'HR sur l'année 2015 évolue dans la plage recommandée, c'est-à-dire 46 % en hiver et 54 % en été (Figure 16).

La stabilité de l'HR est performante, puisque les écarts journaliers ne dépassent pas 1,5 % d'HR et les écarts hebdomadaires sont inférieurs à 3,5 % (Figure 17).

La Figure 18 représente l'évolution du poids d'eau dans l'ambiance du magasin 505. Celui-ci suit parfaitement les tendances des valeurs extérieures ; ses valeurs oscillent dans la fourchette recommandée pour un magasin d'archives, passant par un minimum de 5,6 g_h/kg_{as} aux mois de février et mars, et un maximum de 10,4 g_h/kg_{as} au mois de juillet 2015.

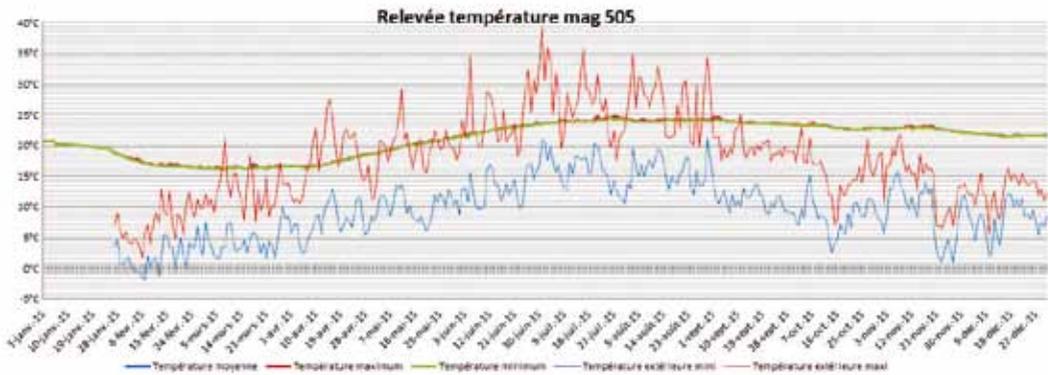


Figure 15. Enregistrements des températures extérieures (mini / maxi) et moyenne du magasin 505 pour l'année 2015

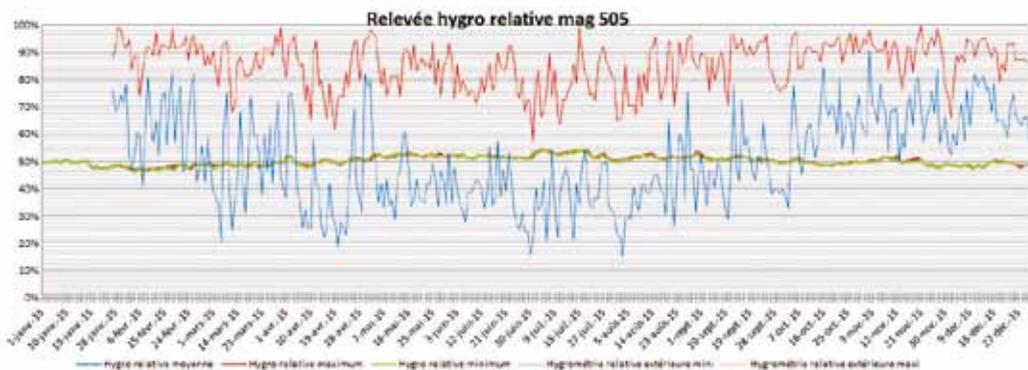


Figure 16. Enregistrements de l'HR extérieure (mini / maxi) et moyenne du magasin 505 pour l'année 2015

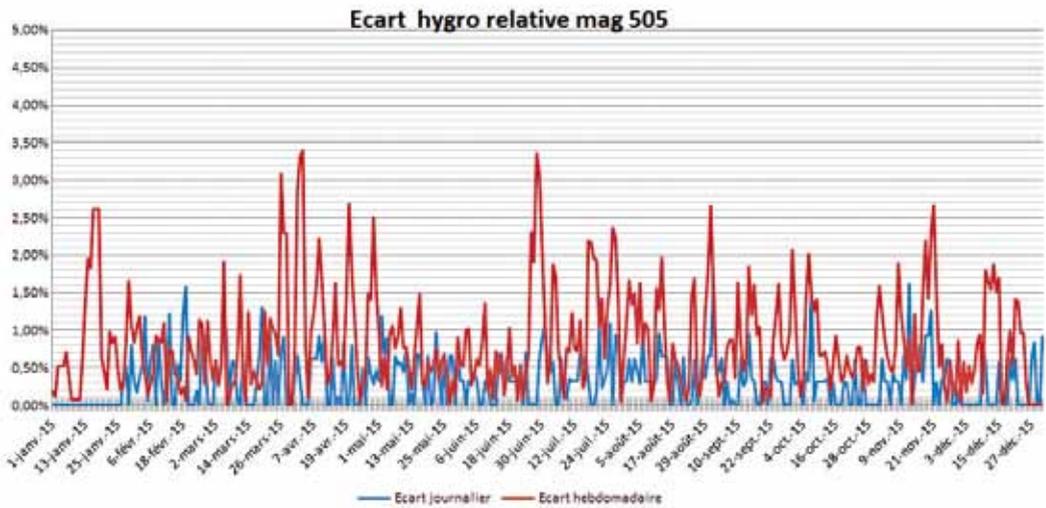


Figure 17. Écarts d'HR journaliers pour le magasin 505 pour l'année 2015

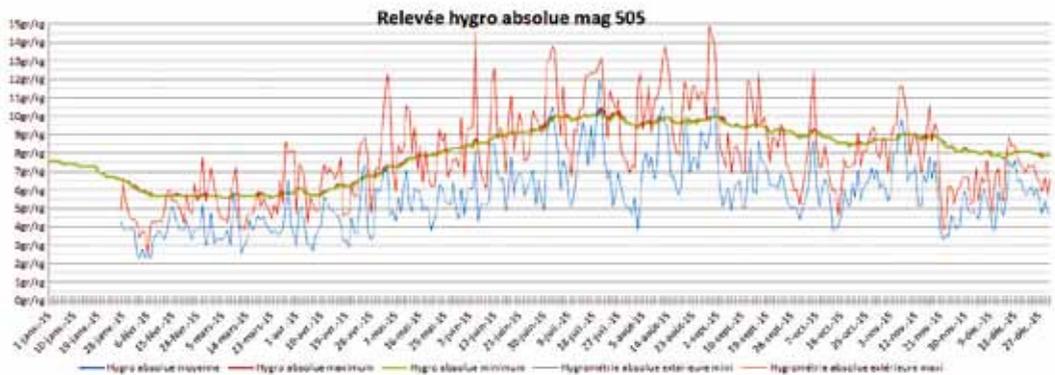


Figure 18. Evolution du poids d'eau dans l'ambiance du magasin 505 pour l'année 2015

5.1.6 Les consommations d'énergie

Chauffage urbain

Les valeurs indiquées en violet dans le Tableau 2 mettent en évidence une surconsommation de chauffage en post-dés-humidification pour les étés 2012 et 2013 en raison de la sollicitation exceptionnelle des CTA dédiées au brassage lors de la mise en service des installations et de l'emménagement des collections.

En prenant l'année 2014 comme année de référence, la consommation de chauffage rapportée au m² de surface utile est de 2 183 000 kWh / 62 048 m² = 35,2 kWh/m².

Électricité

En prenant l'année 2014 comme année de référence, la consommation d'électricité rapportée au m² de surface utile est de 4 836 965 kWh / 62 048 m² = 78 kWh/m².

Cette consommation regroupe l'ensemble des équipements électriques (éclairage, bureautique, appareils de levage, production de froid, et équipements CVC), car il n'est pas possible d'extraire les consommations relevant strictement des installations de génie climatique.

Consommation SDCSD	2012 MWh	2013 MWh	2014 MWh	2015 MWh
janvier		425	325	346
février		378	316	343
mars		374	285	329
avril		297	167	157
mai		257	166	127
juin		157	112	49
juillet	226	112	46	5
août	217	161	26	5
septembre	189	93	74	53
octobre	355	173	113	170
novembre	238	343	159	185
décembre	308	395	394	229
Total annuel	1533	3165	2183	1998

Tableau 2. Consommations de chauffage urbain en MWh

Consommation EDF	2012 kWh	2013 kWh	2014 kWh	2015 kWh
janvier		419 282	454 786	433 452
février		387 830	392 192	389 422
mars		434 241	408 462	395 801
avril		409 910	380 345	365 959
mai		390 316	382 661	367 829
juin		394 618	410 716	378 663
juillet		487 926	242 521	426 581
août		483 544	498 040	411 367
septembre	1 492 826*	437 139	476 093	356 121
octobre	455 788	406 242	384 944	370 064
novembre	372 259	403 552	371 614	378 036
décembre	396 413	443 318	434 591	400 662
Total annuel	2 717 286	5 097 918	4 836 965	4 673 957

*Erreur de comptage, la consommation a été reportée sur les mois suivants.

Tableau 3. Consommations électriques entre 2012 et 2015 en kWh

5.1.7 Commentaires

Les conditions de conservation

L'installation réalisée possède une surpuissance capable de répondre à des variations climatiques importantes, moyennant une conduite ponctuelle adaptée. Lors des déménagements, les dérives climatiques ont été amorties par les installations CVC du site, sans recours à des équipements mobiles. Cette opération de déménagement a duré 24 mois. En régime de croisière, les enregistrements de température et d'HR des magasins sont stables et restent dans les valeurs prévues lors de la conception.

Ces résultats sont essentiellement dus :

- > à l'isolation thermique du bâti ;
- > à la surpuissance de déshumidification des équipements en place ;
- > au principe de régulation du poids d'eau au soufflage, qui permet d'éviter les écarts importants entre le point de consigne et les valeurs mesurées, et par suite les phénomènes de pompage ;
- > au suivi permanent des enregistrements climatiques des magasins.

Les batteries froides des CTA de recyclage n'ont été sollicitées en mode déshumidification que quelques jours par an, par temps chaud et humide. Elles seront utiles en période de canicule.

Les consommations d'énergie

Pour l'année 2014, la consommation globale (chauffage + électricité) s'élève à 7 020 MWh, soit un ratio de :

$$7\,020\text{ MWh} / 62\,048\text{ m}^2 = 113\text{ kWh/m}^2$$

Si l'on retire les surfaces occupées par les magasins qui ne sont pas aménagés (environ un quart de la surface totale), la consommation (chauffage + électricité) s'élève à $7\,020\text{ MWh} / (62\,048 - 10\,000)\text{ m}^2 = 135\text{ kWh/m}^2$

La conduite des installations réalisée par l'équipe technique du site de Pierrefitte permet d'optimiser les consommations tout en respectant les conditions climatiques de conservation. A ce titre, on constate d'ailleurs une diminution d'environ 15 % de la consommation de chauffage et d'électricité entre 2013, année des réglages et des mises au point, et l'année 2014. En 2015, la tendance est à la baisse et il faudra tenir compte des DJU pour faire une analyse comparative de ces consommations.

Cette conduite et ce suivi permanent des conditions (poids d'eau, HR et température) passent par des délestages et des mises au ralenti de certaines parties des installations, par exemple :

- > la diminution du brassage, en jouant sur les variateurs de vitesses d'air des ventilateurs, tout en restant vigilant sur les éventuelles dérives climatiques ;
- > la mise à l'arrêt de la CTA et de la PAC, qui assurent le traitement de l'air neuf lorsque le poids d'eau extérieur dépasse des seuils limites qui ont été fixés à 5 et $11 \text{ g}_h/\text{kg}_{as}$;
- > un fonctionnement par intermittence du traitement de l'air neuf (mode « tortue ») qui consiste à arrêter l'introduction d'air neuf suivant des cycles temporels, mais également lorsque les conditions extérieures sont extrêmes ;
- > une limitation du recours au réchauffage en post-déshumidification de la CTA air neuf, lorsque la température moyenne des magasins est en demande de refroidissement ;
- > l'option de laisser exceptionnellement dériver lentement l'HR des magasins sans solliciter la fonction déshumidification des neuf CTA de recyclage.

Il est évident que ce type de conduite implique une rigueur de suivi et de gestion, que seuls des professionnels expérimentés sur ces types d'installations peuvent assurer.

La maintenance CVC

La société assurant la maintenance est titulaire d'un marché « multi-techniques », qui couvre l'entretien préventif et curatif des installations CVC, le désenfumage, la protection incendie, la plomberie, et l'électricité (courants forts, courants faibles), ainsi que les équipements électromécaniques.

Une équipe de sept techniciens de maintenance, dont un chef de site, assure les prestations d'entretien curatif et correctif.

Les prestations de la partie CVC comprennent :

- > le responsable du site estimé à 1/3 de temps ;
- > la présence de deux techniciens CVC, 5 jours sur 7 qui assurent les entretiens préventifs suivant un planning et la partie entretien curatif.

Les petits travaux et les fournitures supérieures à 1 000 euros HT sont pris en charge dans le cadre d'un marché à bon de commande et les dépannages sont assurés 24 heures sur 24.

L'ensemble de ces prestations est supervisé par le service technique des archives qui assure aussi la conduite des installations et le suivi du climat dans les magasins, car cette équipe dispose de spécialistes CVC capables d'optimiser les performances des installations, ce qui a d'ailleurs permis de diminuer les consommations d'énergie de ce site, tout en maintenant les conditions de conservation dans les magasins.



5.2 Archives départementales des Yvelines à Montigny-le-Bretonneux



Image 16. Bâtiment des Archives départementales des Yvelines à Montigny-le-Bretonneux

5.2.1 Présentation du projet

En 1998, le Conseil général des Yvelines a décidé de lancer le projet de construction du bâtiment des Archives départementales des Yvelines, dans la ville nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines.

Le programme des besoins et des contraintes techniques de conservation a été réalisé par le bureau d'étude SETEC. C'est l'atelier d'architecture ADM, Bernard Feypell, Edouard Zolowski, Pierre Margui et Hervé Vachon qui a été lauréat du concours en 1999. Pour la partie génie climatique, les études ont été menées par le bureau d'étude Thor Ingénierie. Une assistance à maîtrise d'ouvrage pour la partie climat a été confiée au bureau d'étude Sfica. Les travaux CVC ont été réalisés par l'entreprise SAGA.

Les travaux ont démarré en 2001, pour s'achever à la fin de l'année 2003. Le déménagement des archives s'est déroulé entre mai et décembre 2003, pour une ouverture au public en janvier 2004.

Ce site a permis de regrouper les archives qui étaient conservées dans une aile et dans les combles de la Grande Écurie du Roi à Versailles. Ces espaces étaient uniquement chauffés par des radiateurs.

Le Département des Yvelines avait souhaité s'inscrire dans une démarche de type développement durable, puisqu'à cette époque les réglementations RT et les démarches HQE n'existaient pas.

C'est dans cette optique que le principe innovant de construction abritant les magasins s'est orienté vers un bâtiment à très forte inertie thermique, constitué d'une double paroi en maçonnerie. L'objectif était de maintenir des conditions ambiantes sans avoir recours à une climatisation ; seule une ventilation et un chauffage permettraient de corriger les éventuelles dérives de température et d'HR.

5.2.2 Le projet en quelques chiffres

Le bâtiment et ses magasins

- > La surface hors œuvre nette (SHON) est de 15 538 m² :
 - surface hors œuvre brute (SHOB) : 15 538 m²,
 - surface hors œuvre nette de plancher (SHON) : 11 836 m², sachant que les possibilités étaient de 12 000 m² extensibles de 4 000 m² (soit 16 000 m²).
- > La surface utile est de 11 836 m².
- > La surface des bâtiments magasins et traitement des collections est de 8 329 m², ce qui représente 70 % de la surface du site. Les 20 magasins, et les 4 réserves sont répartis de la manière suivante :
 - 15 magasins à rayonnages mobiles,
 - 3 magasins à rayonnages fixes,
 - 2 magasins pour les grands formats (cartes et plans),
 - 2 réserves des collections archéologiques dont l'une est pourvue d'un espace indépendant pour les collections de métaux,
 - une réserve pour les objets d'art et une réserve pour les maquettes.
- > La capacité de stockage des rayonnages est de 32 km linéaires.

Les équipements CVC

- > Conditions à maintenir dans les magasins (suivant programme) :
 - température : 18 °C ± 2 °C,
 - HR : 50 % ± 5 %.
- > Puissance froide : 324 kW.
- > Puissance de la production de chaleur : 740 kW.
- > Le système est en « tout air neuf ».
- > Le débit total maximum des 3 CTA air neuf des magasins est de 23 000 m³/h.
- > Le débit total des 3 ventilateurs d'extraction est de 23 000 m³/h ; ils sont asservis aux cycles de fonctionnement des CTA air neuf.
- > Le brassage correspond au cumul du

débit d'air neuf des CTA (1 000 m³/h par magasin), auquel il faut rajouter le débit des brasseurs d'air plafonnier, soit 2 fois 250 m³/h, ce qui fait un total de 1 500 m³/h. Compte tenu du fonctionnement en « mode tortue », le débit dans chaque magasin varie entre 500 et 1 500 m³/h. Dans cette configuration, on aura :

- un brassage entre 1 et 3 vol/h, magasins vides,
 - un renouvellement d'air entre 0 et 2 vol/h.
- > Il n'y a aucune puissance froide disponible pour la déshumidification de l'air neuf des magasins (pour les 3 CTA air neuf).
 - > Il n'y a pas de fonction humidification.
 - > Les 4 CTA principales qui traitent en climatisation les espaces autres que les magasins ont un débit cumulé important de 46 985 m³/h.

5.2.3 Description de l'enveloppe du bâtiment et de son zonage

Enveloppe du bâti

Les magasins d'archives n'ont pas d'ouvrant mais les circulations les desservant sont éclairées naturellement. L'enveloppe du bâtiment est constituée :

Pour les murs extérieurs, de l'intérieur vers l'extérieur :

- > d'un mur intérieur en briques creuses en terre cuite, d'une épaisseur de 20 cm ;
- > d'une lame d'air de 15 cm ;
- > d'une structure en béton armé d'une épaisseur de 25 cm ;
- > d'un pare-vapeur constitué d'une feuille d'aluminium ;
- > de panneaux de laine de verre de 15 cm ;
- > d'une lame d'air de 4 cm dans lequel se trouve la structure supportant les dalles de parement de façade ;
- > d'un habillage extérieur constitué de pierre de parement.

Le complexe « béton + lame d'air + briques creuses » optimise l'inertie thermique. En effet, en période chaude, la chaleur accumulée par le mur en béton est diffusée dans la lame d'air, puis émise vers le mur en briques creuses, ce qui constitue un retardateur très efficace pour limiter la transmission de chaleur vers les magasins.

Pour les murs intérieurs de séparation entre les magasins et les circulations :

Ils sont constitués de briques creuses de 20 cm d'épaisseur, qui apportent une isolation thermique supérieure aux murs en parpaings ou en béton. Par contre, leur faible capacité hydrique par rapport au papier (1 % de son poids pour la brique, contre 8 % pour le papier) ne permet pas d'optimiser la régulation de l'hygrométrie des magasins.

La terrasse est constituée de l'intérieur vers l'extérieur :

- > d'une dalle en béton et chape, d'épaisseur de 30 cm ;
- > d'un pare-vapeur en feuilles d'aluminium ;
- > d'un isolant thermique de 10 cm en polyuréthane extrudé ;
- > d'une étanchéité constituée de couches d'asphalte ;
- > d'une lame d'air ventilée de 10 cm ;
- > de dalles posées sur plots.

La lame d'air ventilée située sous les dalles sur plots permet de limiter les apports par rayonnement solaire et de diminuer ainsi l'absorption calorifique de la dalle béton.

Avant d'arriver à cette conception, des simulations thermiques dynamiques avec plusieurs options constructives ont été étudiées par la maîtrise d'œuvre.

Répartition des espaces

Au rez-de-chaussée se trouvent principalement :

- > les espaces accessibles au public (hall d'accueil, salle d'exposition, salle de lecture et de consultation, salle polyvalente et service éducatif) ;
- > les espaces pour le personnel ;
- > la zone de réception des documents (déchargements, quarantaine, salle de tri et de transit) ;
- > les espaces du service archéologie (bureaux, ateliers de restauration, salle de traitement, de lavage et d'emballage) ;
- > deux magasins dédiés aux cartes et plans ;
- > un espace dédié aux collections du patrimoine, comprenant deux réserves (maquettes et objets d'art) ;
- > le poste de sécurité.

Au premier étage, sont implantés :

- > les espaces bureaux de l'administration et de la conservation (salles de réunion et local informatique) ;
- > deux salles d'étude des objets archéologiques ;
- > l'atelier photographique.

Du 2^e au 5^e étage :

Le bâtiment de conservation comprend 4 niveaux (du R+2 au R+5) à raison de 5 magasins par étage, d'une surface d'environ 200 m² chacun et d'une hauteur sous plafond de 2,50 m. Ces magasins sont répartis sur la longueur du bâtiment, avec un mur extérieur côté façade arrière, exposé nord-ouest. À l'opposé, les murs donnent sur une circulation, dont le mur extérieur constitue la façade exposée au sud-est. Au dernier niveau, une partie des magasins est située sous la terrasse ; l'autre partie sous les locaux techniques.

Au deuxième étage, deux magasins ont été aménagés en réserves, à savoir :

- > un dépôt de fouilles et une petite réserve sèche ;

- > deux réserves d'objets archéologiques dont l'une équipée d'une petite réserve sèche (magasins 2.4 et 2.5).

Au 6^e étage :

- > les locaux techniques de traitement d'air ;
- > la chaufferie gaz.

Au sous-sol se trouvent :

- > des locaux techniques (CVC, plomberie et électricité) ;
- > un parking de 27 places ;
- > une galerie technique.

5.2.4 Description technique du traitement de l'air

Les équipements sont prévus pour assurer le chauffage des locaux du personnel, le traitement d'air des magasins et des espaces de travail et la climatisation des espaces accessibles au public et des bureaux.

Production de chaleur

Le chauffage est assuré par deux chaudières à gaz d'une puissance unitaire de 370 kW, soit une puissance totale de 740 kW, avec un régime de température d'eau chaude de 85/70 °C.

Deux réseaux partent de cette chaufferie, avec leur propre régulation, pour alimenter en eau chaude les différents émetteurs (radiateurs, CTA et planchers chauffants).

Production d'eau glacée

Deux groupes frigorifiques à condenseur à air de 162 kW unitaire, soit une puissance totale de 324 kW, sont installés en terrasse. Ils fonctionnent avec un régime d'eau glacée de 7/12 °C pour distribuer deux circuits :

- > 1 circuit à température constante pour l'alimentation des batteries froides des CTA et des terminaux (cassettes et ventilo-convecteurs) ;
- > 1 circuit à température variable pour les planchers rafraîchissants, qui fonc-

tionnent en change-over avec le circuit chauffage.

Traitement d'air des magasins

L'objectif du cahier des charges était de maintenir les conditions ambiantes des magasins (18 °C ± 2 °C et 50 % ± 5 % HR toute l'année) en utilisant uniquement le potentiel d'énergie de l'air extérieur et en optimisant les cycles de fonctionnement de la ventilation (adoption d'un mode tortue lorsque les conditions extérieures sont très défavorables). Les systèmes de rafraîchissement, d'humidification et de déshumidification sont exclus du projet. On doit toutefois maintenir une température minimale de 16 °C dans les magasins quelle que soit la saison, en assurant le chauffage de l'air extérieur.

Le traitement d'air des magasins est en « tout air neuf ». Il se divise en trois secteurs (1A, 1B et 1C), composés chacun d'une CTA assurant les fonctions de chauffage, filtration et ventilation, associée à un caisson d'extraction d'air (Figure 19).

Cette installation comprend :

- > deux CTA identiques, équipées d'un ventilateur de soufflage à deux vitesses (petite vitesse ou PV et grande vitesse ou GV) d'un débit de 4 500/9 000 m³/h, qui assurent chacune le traitement d'air de neuf magasins répartis sur deux fois deux conduits verticaux (soufflage et reprise) chacun ayant un registre motorisé ;
- > une CTA identique aux deux précédentes, comprenant un ventilateur de soufflage d'un débit de 5 000 m³/h, pour le traitement d'air de cinq magasins sur deux colonnes (soufflage et reprise) ;
- > ces trois CTA sont associées à trois caissons d'extraction (2 fois 4 500/9 000 m³/h, et 1 fois 5 000 m³/h) ; leur fonctionnement est asservi à celui des ventilateurs des

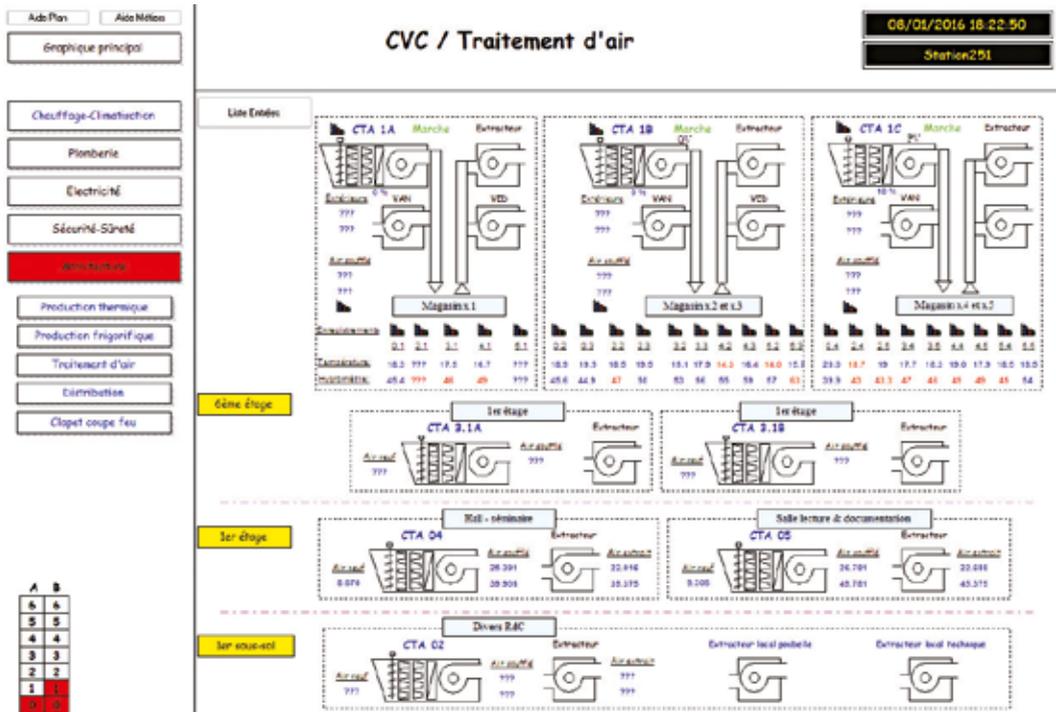


Figure 19. Schéma aéralique du traitement d'air de l'ensemble du site des Archives départementales des Yvelines

CTA, et ils rejettent l'air des magasins vers l'extérieur sans récupération d'énergie ;

> la régulation est assurée à partir de la GTB.

L'automate gère, par colonne, la moyenne des ambiances de chaque magasin (température, HR et poids d'eau). Lorsque les valeurs d'un magasin se trouvent hors de la plage neutre (seuils mini/maxi), l'automate donne l'autorisation d'ouverture aux registres motorisés de la colonne concernée, puis l'ordre de marche aux ventilateurs (soufflage/extraction) en petite vitesse. Si un magasin de la deuxième colonne du secteur concerné dépasse les seuils limites, son registre s'ouvre et les ventilateurs passent en grande vitesse.

Dans chaque magasin, une sonde mesure la température et l'HR, puis l'automate calcule le poids d'eau et les moyennes des magasins pour chaque conduit. Lorsque les valeurs d'un magasin sont hors plage, l'automate de gestion compare ces valeurs à celles de l'air extérieur, puis autorise les cycles de ventilation « marche/PV ou GV/ar-rêt » afin de maintenir les conditions d'ambiance.

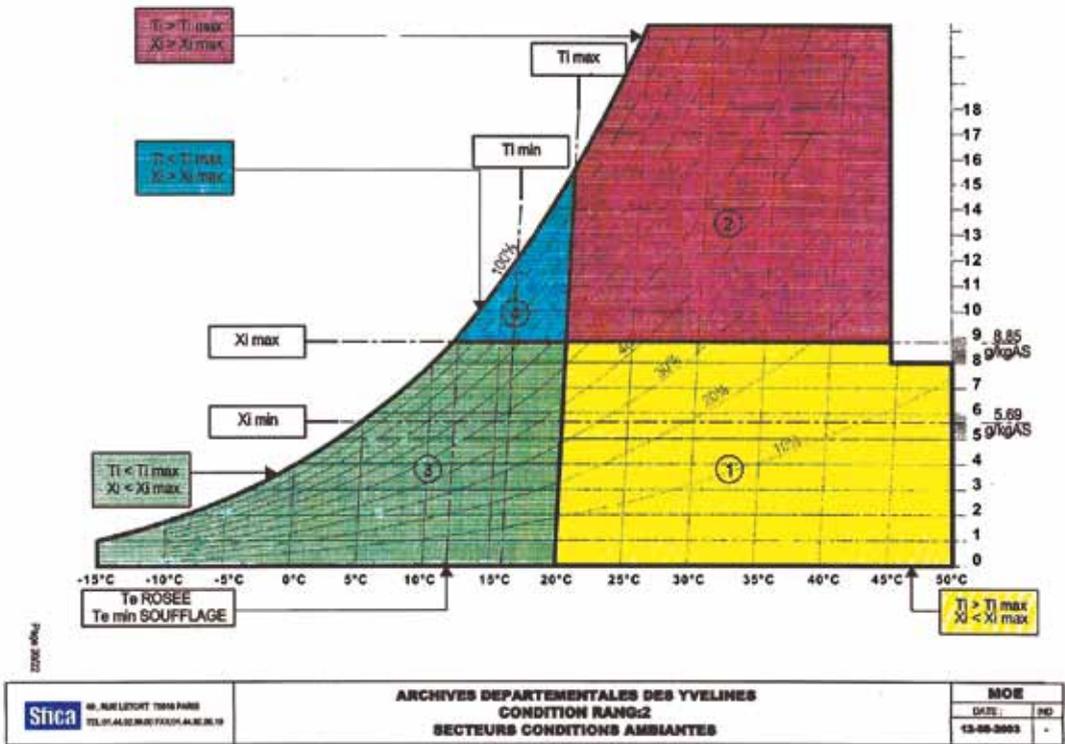


Figure 20. Secteurs des conditions ambiantes reproduites sur le diagramme psychrométrique de l'air

Un logigramme de programmation et d'automatisme des modes de fonctionnement de la ventilation et du chauffage a été conçu spécifiquement pour cette installation. Il se présente sous la forme d'une arborescence des différents critères climatiques ambiants (T, HR, et poids d'eau).

Les paramètres programmés dans le logiciel définissent des zones dans l'abaque psychrométrique de l'air humide, qui s'inscrivent entre les seuils suivants :

- > $T_{i\text{ mini}} (16\text{ °C}) < T_{i\text{ consigne}} < T_{i\text{ maxi}} (20\text{ °C})$;
- > $HR_{\text{ mini}} (50\%) < HR_{\text{ consigne}} < HR_{\text{ maxi}} (60\%)$;
- > $\text{Poids d'eau}_{\text{ mini}} (5,7\text{ g}_h/\text{kg}_{\text{as}}) < \text{Poids d'eau}_{\text{ ambiante}} < \text{Poids d'eau}_{\text{ maxi}} (8,9\text{ g}_h/\text{kg}_{\text{as}})$.

Sur le diagramme psychrométrique présenté en Figure 20, on distingue les 4 secteurs principaux et 6 sous-secteurs qui ont été déterminés en tenant compte des seuils limites de température et de poids d'eau.

L'interprétation de l'arborescence du logigramme « arrêt/ventilation–chauffage » est particulièrement compliquée. On privilégie la température sur l'hygrométrie. Le maintien d'une température minimum de 16 °C est prioritaire. De ce fait, l'installation fonctionne en tout air neuf et en mode chauffage en période hivernale froide, ce qui a pour conséquence une perte de contrôle de l'hygrométrie qui peut alors être beaucoup trop basse (HR<30 %).

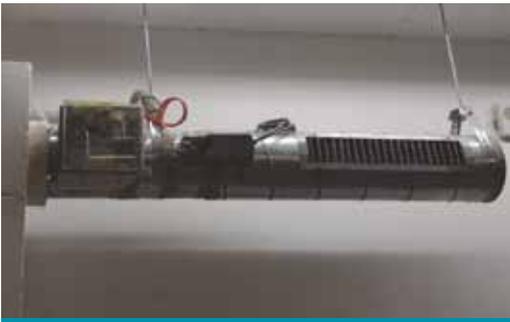


Image 17. Point d'introduction d'air traité dans les magasins

Diffusion de l'air

Dans chaque magasin se trouve une bouche de soufflage (Image 17) et un volet motorisé qui fonctionne en tout ou rien. Il n'y a pas d'organe d'équilibrage de débit d'air. La reprise d'air se fait par une grille placée sur le mur opposé, et son volet d'air est asservi à celui du soufflage.

On trouve dans chaque moitié de magasin un ventilateur brasseur d'air d'un débit unitaire de 250 m³/h, placé en plafond des circulations (Image 18). Ces deux appareils assurent un brassage d'air d'environ 1 vol/h en permanence.

Les réseaux aérauliques sont également utilisés pour le désenfumage mécanique des magasins. Les ventilateurs d'insufflation (VAN) et d'extraction (VED) de désenfumage sont implantés sur le schéma de principe aéraulique.

Traitement d'air des réserves patrimoine et archéologie

Des réserves d'objets d'art et d'archéologie ont été aménagées dans les magasins standards, et leur traitement d'air (chauffage, ventilation et mode tortue) est assuré par les installations centralisées des magasins d'archives. Il s'agit :

- > d'une réserve d'objets archéologiques implantée au deuxième étage dans le magasin 2.5, dans lequel les enregistrements ont été réalisés depuis 2004, indé-



Image 18. Brasseur d'air en plafond des magasins d'un débit de 250 m³/h (2 par magasin)

pendamment de la GTB. Cette réserve est équipée de deux brasseurs d'air plafonniers ;

- > d'une deuxième réserve d'objets archéologiques également implantée au deuxième étage dans le magasin 2.4, dans lequel a été aménagée une petite « réserve sèche » dédiée à la conservation des métaux. Pour maintenir un climat inférieur à 40 % d'HR, il a fallu l'isoler du traitement d'air des magasins, et l'équiper d'un déshydrateur à adsorption ; l'air de régénération de cet équipement est rejeté dans l'autre partie de la réserve, et repris dans le réseau d'extraction des magasins ;
- > au rez-de-chaussée, le magasin 03 a été aménagé en deux réserves ; la première abrite des collections de mobiliers et d'objets d'art et l'autre, des maquettes. Ces réserves sont implantées en partie centrale du bâtiment et bénéficient d'une température stable. En revanche, l'HR est d'autant plus instable qu'il n'y a pas de masse de papier pour réguler l'hygrométrie.

Les autres traitements d'air

- > La CTA 04, d'un débit d'air de 13 600 m³/h, traite le hall ouest avec son espace vestiaire, la salle d'exposition et l'espace séminaires ; elle assure les fonctions de filtration, ventilation, gestion du renouvellement d'air en free-cooling, chauffage, refroidissement et humidification.

Des batteries chaudes terminales permettent d'ajuster la température de la salle d'exposition et du hall en fonction des charges ambiantes. La fonction déshumidification prévue dans l'analyse fonctionnelle peut générer des consommations d'énergie abusives, puisque l'entrée d'air hygiénique fonctionne en free-cooling ;

- > la CTA 05, d'un débit d'air de 23 000 m³/h, traite la salle de lecture, la documentation et des locaux annexes. Elle assure les mêmes fonctions que la CTA 04 ; les réseaux de salles de lecture et de documentation sont également équipés de batteries chaudes terminales ;
- > la CTA 02, d'un débit d'air de 7 850 m³/h, fonctionne en tout air neuf pour le traitement de l'air hygiénique des ateliers de restauration et de locaux annexes ; elle assure les fonctions de filtration, renouvellement d'air, chauffage, refroidissement et humidification. Trois caissons d'extraction sont asservis au fonctionnement de cette CTA ;
- > les deux CTA 3-1A et 3-1B ont chacune un débit de 1 265 m³/h et alimentent en air hygiénique à température contrôlée les espaces bureaux et salles de réunion (zone ouest et zone est) ;
- > des terminaux de type cassettes, ou ventilo-convecteurs alimentés en chaud et en froid, contribuent au maintien du confort de certains espaces, dont les bureaux ;
- > les bureaux sont également équipés de planchers réversibles (chauffage, rafraîchissement).

5.2.5 Les conditions climatiques des magasins

La GTB qui permettait d'enregistrer le climat des magasins est hors service depuis 2006. Des enregistrements couvrant la période de novembre 2003 à 2006 ont toutefois pu être exploités (la Figure 21 présente les relevés de 2006).

Par ailleurs, la réserve archéologique (magasin 2.5) est équipée d'enregistreurs autonomes, qui ont permis d'analyser le climat de cette réserve depuis l'ouverture de ce site.

En octobre 2015, un nouveau système d'enregistreurs de température et d'HR indépendant a été mis en place, ce qui a permis d'analyser l'évolution du climat sur plusieurs semaines. Dix capteurs ont été installés dans les magasins. Pour cette période, on a pu comparer le climat entre le magasin 5.5 (rempli d'archives), et le magasin 2.5 (réserve d'objets archéologiques) qui sont sur la même colonne de traitement d'air.

On constate entre le 16 novembre 2015 et le 10 janvier 2016 une bonne stabilité de la température (Figure 22). Cette période hivernale est toutefois restée tempérée. Début septembre, la température était de 23 °C, puis est descendue régulièrement pour atteindre 18 °C début décembre.

En revanche, l'HR est très instable, ce que confirment les enregistrements de l'année. On distingue très nettement des variations importantes consécutives aux cycles « marche /arrêt » de la CTA, qui se manifestent début novembre, c'est-à-dire au moment où les besoins de chauffage deviennent nécessaires pour assurer une température minimum de 16 °C.

Le 20 novembre, la température extérieure s'est rapprochée de 0 °C, ce qui a nécessité un chauffage plus important, provoquant ainsi une baisse de l'HR, dont les valeurs étaient inférieures à 40 % avec un minimum de 32 %. Avec un hiver plus rigoureux, l'HR serait certainement descendue en deçà des 30 %, valeur d'ailleurs constatée sur d'anciens relevés climatiques.

Si la courbe d'HR du magasin 5.5 (Figure 23) a un peu moins d'amplitude que celle du magasin 2.5 (la masse de papier y est certainement pour quelque chose), leurs profils sont très similaires.

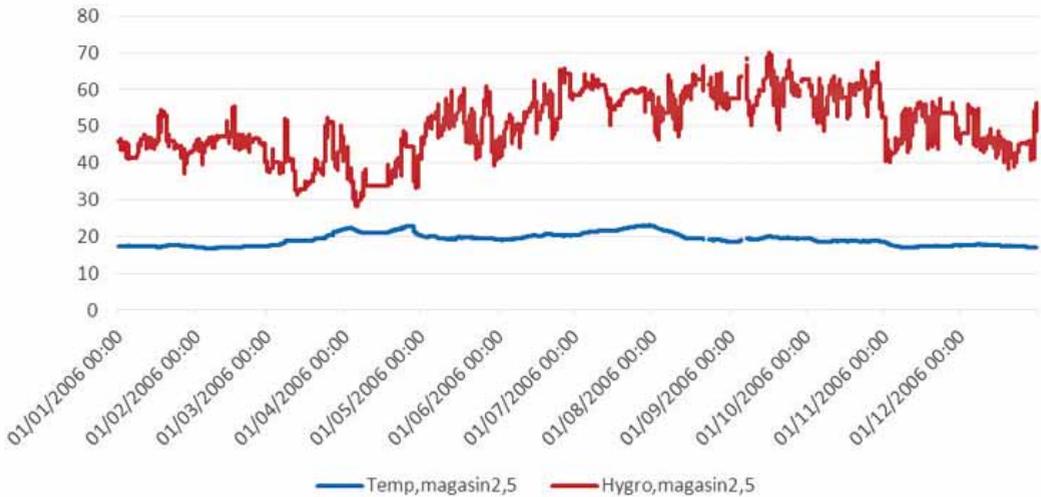


Figure 21. Enregistrements de la température et de l'HR sur l'année 2006 dans la réserve 2.5 (réserve d'objets archéologiques) - 2^{ème}, Colonne C

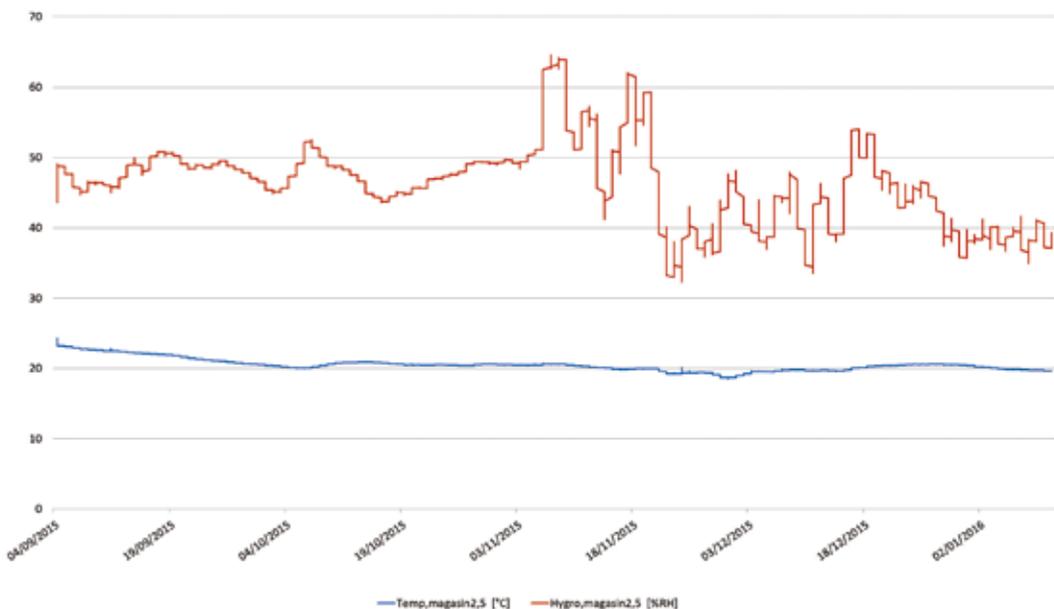


Figure 22. Enregistrements de la température et de l'HR du 04/09/2015 au 10/01/2016 dans la réserve 2.5 (réserve d'objets archéologiques)- 2^e étage, Colonne C

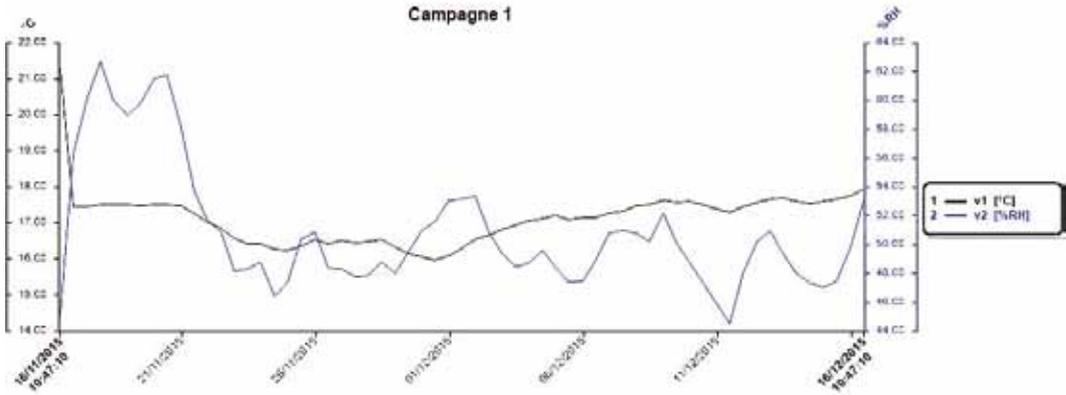


Figure 23. Enregistrements de la température et de l'HR entre le 16/11/2015 et le 16/12/2015 dans la réserve 5.5 - 5° étage, Colonne C

5.2.6 Les consommations d'énergie

On a sélectionné les consommations de gaz et d'électricité sur l'année 2014.

Chauffage

La consommation de chauffage au gaz rapportée au m² de surface utile est de :

$$840\,161 \text{ kWh} / 11\,836 \text{ m}^2 = 71 \text{ kWh/m}^2 \text{ de surface utile}$$

Électricité

La consommation d'électricité rapportée au m² de surface utile est de :

$$674\,278 \text{ kWh} / 11\,836 \text{ m}^2 = 57 \text{ kWh/m}^2 \text{ de surface utile}$$

Cette consommation regroupe l'ensemble des équipements électriques (éclairage, bureautique, appareils de lavage, production de froid et équipements CVC) puisqu'en effet, il n'est pas possible pour ce bâtiment de séparer les consommations électriques relevant spécifiquement des installations en génie climatique (moteurs, pompes, ventilateurs, groupes froid...).

5.2.7 Commentaires

Les conditions de conservation

Sur les relevés de la GTB disponibles pour l'année 2006 (Figure 21), on peut constater que la température n'a pas dépassé les 24 °C, probablement grâce au double mur et au fonctionnement en « mode tortue » de la ventilation.

- En été, hors période caniculaire, l'absence de froid est compensée par un fonctionnement de la ventilation uniquement lorsque la température extérieure est inférieure à celle des magasins (essentiellement la nuit), et lorsque le poids d'eau extérieur est inférieur à celui de la moyenne des magasins. Ce système, à priori vertueux, présente néanmoins un défaut non négligeable : lorsque la température intérieure dépasse un certain seuil, la priorité est donnée à la régulation de la température. Celle-ci est abaissée grâce à l'activation de la ventilation nocturne sans régulation de l'hygrométrie. Le poids d'eau extérieur en été étant généralement élevé, l'HR augmente fréquemment à des valeurs supérieures à 60 %.

> En hiver, les batteries chaudes des CTA maintiennent la température des magasins au-dessus de 16 °C. Dès que la température extérieure descend sous les 5 °C, l'HR descend fréquemment autour de 30 % du fait de l'absence d'équipement d'humidification.

On peut conclure que la température des magasins reste assez stable et ne dépasse pas les 24 °C sans production de froid. Par contre, l'hygrométrie n'est pas stable et les valeurs d'HR dépassent les 60 % en été et descendent sous les 30 % en période hivernale froide.

Ces conclusions, basées sur les relevés de 2006, peuvent être étendues à la période 2015-2016 qui présente des conditions climatiques comparables.

Les consommations d'énergie

La consommation de chauffage de ce site est élevée pour une installation qui n'assure aucun traitement d'hygrométrie dans les magasins d'archives.

La consommation globale (chauffage + électricité) s'élève à 1 514 439 kWh, soit un ratio de : 128 kWh par m².

Ce site, qui est l'un des premiers à optimiser l'effet d'inertie thermique d'un bâtiment de magasins d'archives grâce aux doubles murs intérieurs en briques creuses de terre cuite, ne bénéficie pas d'un bilan énergétique performant. On peut évoquer quelques points qui en sont la cause :

> le chauffage et le refroidissement des bureaux qui cumulent les planchers chauffant/rafraîchissant, le traitement de l'air hygiénique (chaud et froid) et les caassettes en plafond (chaud et froid) avec chacun un système de régulation autonome pouvant se contrarier ;

> les 3 CTA des magasins fonctionnent en tout air neuf, ce qui est très pénalisant pour la consommation de chauffage, même si le « mode tortue » permet de diminuer le temps de fonctionnement de ces équipements. La dimension des locaux techniques et l'implantation des CTA permettraient d'installer des équipements adaptés au traitement de l'hygrométrie, ainsi que des systèmes de récupération d'énergie entre l'air extrait et l'air neuf ;

> le traitement de l'hygrométrie sur des installations distribuant des espaces dont les besoins sont différents (salle d'exposition, de lecture, documentation, locaux divers...) et fonctionnant en free-cooling ;

> la CTA tout air neuf avec un traitement de l'hygrométrie pour les espaces de restauration.

La maintenance CVC

La maintenance des installations CVC est assurée par une entreprise de maintenance, titulaire d'un marché de type P2 qui couvre la conduite, l'entretien préventif, l'entretien curatif, les petites fournitures et les produits consommables. Les prestations comprennent la présence d'un technicien, 1 journée par semaine, les petites interventions curatives et les dépannages 24 heures sur 24. Le contrat de type P2 s'arrête fin août 2016 et un contrat de type PFI commence le 1^{er} septembre 2016 avec le même prestataire pour une durée de 8 ans.

Il existe un marché à bons de commande, qui permet de couvrir les petits travaux de renouvellement d'équipement hors d'usage.

Ces prestations sont supervisées par les responsables techniques de la direction du patrimoine immobilier et de la construction (DPIC) au Département des Yvelines, qui assurent la gestion technique du bâtiment, en liaison directe avec le responsable de la sécurité du site des archives.



5.3 Archives du département du Rhône et de la métropole de Lyon



Image 19. Bâtiment des Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon

5.3.1 Présentation du projet

En 2005, le Conseil général du Rhône a décidé de lancer le projet de construction du bâtiment des Archives départementales du Rhône, sur un terrain situé dans le quartier de la Part-Dieu à Lyon.

Ce sont les cabinets d'architecture Gautier+Conquet et Bruno Dumetier qui ont été lauréats du concours en 2008. Pour la partie génie climatique, les études ont été menées par le Bureau d'étude Technip TPS (agence de Lyon), et les travaux CVC ont été réalisés par l'entreprise Spie Sud Est (division opérationnelle Génie Climatique).

Les travaux ont démarré en 2011, pour s'achever à la fin de l'année 2013. Le déménagement des archives s'est déroulé entre mars et juillet 2014, pour une ouverture au public en septembre 2014.

Ce site a permis de regrouper les archives stockées dans des anciens bâtiments, dépourvus de moyens de sécurité et de conservation. Il s'agissait de trois sites : un ancien couvent situé sur la colline de Fourvière et deux anciennes usines situées dans l'agglomération de Lyon.

Le Département du Rhône a souhaité s'inscrire dans une démarche Haute Qualité Environnementale : c'est dans cette optique que le principe de construction d'une double peau a été adopté. L'enveloppe intérieure du bâtiment est constituée d'une structure lourde en béton armé, habillée à l'extérieur par une façade légère isolante ; entre les deux se trouve un vide d'environ 0,80 m servant de plénum pour véhiculer l'air traité vers les magasins.

5.3.2 Le projet en quelques chiffres

Le bâtiment et ses magasins

- > La surface hors œuvre nette (SHON) est de 19 080 m².
- > La surface utile est de 13 783 m².
- > La surface des bâtiments magasins est de 8 300 m², ce qui représente 60 % de la surface du site, soit au total 51 magasins qui se répartissent de la manière suivante :
 - 24 magasins à rayonnages mobiles,
 - 23 magasins à rayonnages fixes,
 - 3 magasins grands formats (cartes et plans),
 - 1 magasin pour les documents photographiques et 6 armoires réfrigérées.
- > La capacité de stockage des rayonnages est de 71 km linéaires.

Les équipements CVC

- > Conditions à maintenir dans les magasins (suivant analyse fonctionnelle) :
 - température : comprise entre 16 °C et 24 °C avec une variation maximale de 0,5 °C/jour,
 - HR : comprise entre 40 % et 60 % avec une variation maximale de 1 %/jour.
- > Puissance froide des thermo-frigo-pompes (TFP) : 2 x 275 kW = 550 kW, avec un régime d'eau glacée de 7/12 °C.
- > Puissance de la production de chaleur des TFP : 2 x 340 kW = 680 kW, avec un régime d'eau chaude de 40/30 °C.
- > Caractéristiques des puits de captage et de rejet : régime 18/23 °C.
- > Le débit des CTA air neuf des magasins varie entre 0 et 2 300 m³/h, soit pour les 3 bâtiments un débit cumulé de 6 900 m³/h, ce qui représente un renouvellement d'air compris entre 0 vol/h et 0,30 vol/h, magasins vides.
- > Débit global des 3 CTA de recyclage : 3 x 23 000 m³/h = 69 000 m³/h, ce qui correspond à un brassage de 3 vol/h.
- > Puissance froide disponible pour la dés-humidification de l'air neuf (pour les 3

CTA air neuf) : 48 kW, utilisée uniquement en secours en cas de dérive importante de l'HR moyenne des magasins.

- > Puissance de réchauffage en post-dés-humidification pour les 3 CTA air neuf : 3 x 8,1 kW = 24,3 kW.
- > Puissance d'humidification des 3 CTA air neuf : 3 x 15 kg = 45 kg de vapeur/h, soit 6,5 g/m³ air neuf .h.

5.3.3 Description de l'enveloppe du bâtiment et de son zonage

Ce bâtiment est composé de trois types d'architectures bien distinctes, qui se superposent de la façon suivante :

- > un socle en pierre basalte au rez-de-chaussée, qui abrite :
 - les espaces accessibles au public : hall, auditorium, salle de lecture, salle de conférence, service éducatif. Ces locaux disposent de grandes surfaces vitrées, assurant la lumière naturelle nécessaire à ces activités,
 - la zone de réception et de traitement des documents : salle des versements, quarantaine, pilon ;
- > le corps principal du bâtiment constitué de 3 « blocs » revêtus d'une double peau en métal doré. Cette partie de l'édifice abrite les 51 magasins d'archives, répartis de la façon suivante :
 - les blocs nord et sud qui abritent chacun 18 magasins répartis sur 6 niveaux,
 - le bloc central qui est accolé au bloc nord et abrite 15 magasins répartis sur 5 niveaux,
 - une liaison entre le bloc central et le bloc sud, en retrait de la façade, qui abrite sur 5 niveaux, des locaux de tri ;
- > la partie supérieure du bâtiment, constituée d'une double peau en verre qui est séparée de la façade principale par une

circulation d'environ 0,80 m de large, espace qui est ventilé naturellement ; cette enveloppe transparente est munie d'un système de protection solaire. Les deux niveaux supérieurs abritent :

- un espace administratif regroupant les bureaux de la conservation et les salles de réunion,
- un espace pour le personnel avec une salle de repos et un coin repas,
- les ateliers de restauration et de traitement des documents graphiques,
- deux appartements de fonction,
- les locaux techniques abritant les équipements de traitement d'air.

La double peau métallique habille les trois blocs de magasins, depuis les niveaux R+1 (R+2 pour le bloc central), jusqu'aux niveaux R+6. Les murs extérieurs des magasins sont constitués, de l'intérieur vers l'extérieur, des éléments suivants :

- > la structure en maçonnerie (béton armé) d'une épaisseur de 0,20 m, qui favorise l'inertie thermique des magasins ;
- > un espace d'environ 0,80 m, servant de plénum de soufflage de l'air provenant des CTA. Dans chaque magasin, il y a une porte d'accès aux plénums qui sont pourvus de caillebotis métalliques permettant la circulation du personnel de maintenance. Un tiers environ des façades exposées plein ouest n'est pas pourvu de plénum ; il s'agit des façades situées à l'arrière des blocs ;
- > l'enveloppe extérieure formée d'un complexe comprenant :
 - un bardage en acier laqué fixé sur les structures supports des caillebotis,
 - une double isolation thermique d'une épaisseur de 0,20 m, constituée par des panneaux croisés de laine de roche maintenus par les structures du bardage,

- la façade extérieure constituée de panneaux emboutis d'alliage cuivre/aluminium, lui donnant son aspect doré.

La double peau en verre des deux étages supérieurs du bâtiment qui habille les espaces de bureaux et les logements de fonction, est fixée sur une ossature acier ; le vide entre les parois extérieures des bureaux et l'habillage en verre simple vitrage est d'environ 0,80 m et se trouve largement ventilé par des ouvertures hautes et basses. Des vantelles orientables permettent de se protéger du rayonnement direct du soleil.

Les parois extérieures des bureaux sont constituées de panneaux de type mur-rideau isolés, et de châssis vitrés aluminium à rupture de pont thermique avec un double vitrage, dont certains sont ouvrants. Ces châssis sont protégés du rayonnement solaire par des stores vénitiens placés à l'extérieur.

5.3.4 Description technique des installations CVC

Les productions de chaud et de froid sont assurées par 2 TFP utilisant l'eau de la nappe souterraine comme sources chaude et froide.

Puits de captage et de rejet

L'eau de la nappe phréatique d'une profondeur de 80 m est aspirée par une pompe immergée à débit variable (débit maximum = 72 m³/h) implantée dans un puits de captage. Cette eau est utilisée après filtration, comme fluide primaire d'alimentation de trois échangeurs à plaques :

- > l'échangeur de la source chaude pour les évaporateurs des TFP (production d'eau glacée 7/12 °C) ;
- > l'échangeur de la source froide pour les condenseurs des TFP (production d'eau chaude 40/30 °C) ;

> l'échangeur pour le réseau d'eau rafraîchie (régime 18/23 °C), assurant un échange direct avec la nappe. La température moyenne de cette eau varie entre 15 °C et 17 °C suivant la saison.

En sortie des trois échangeurs, l'eau est collectée puis rejetée dans un puits de rejet.



Image 20. Échangeur d'eau rafraîchie et filtration de l'eau du puits

Production de chaleur et de froid

> Les TFP fonctionnent en cascade et en parallèle. Leur passage du mode chaud en mode froid et inversement, est piloté en fonction de deux paramètres :

- basculement en mode chaud si $T_{\text{ext}} < 13\text{ °C}$ et en mode froid si $T_{\text{ext}} > 15\text{ °C}$,
- la plus grande puissance appelée en chaud ou en froid (d'après les compteurs de calories).

> Les condenseurs alimentent en eau chaude (régime 40/30 °C) les circuits suivants :

- 2 départs à température variable vers les planchers chauffants du hall et de la salle de lecture,
- 1 départ à température constante pour les CTA, les radiateurs, et les cassettes,
- 1 départ pour les poutres climatiques à température variable.

> Les évaporateurs alimentent en eau glacée (régime 7/12 °C) les circuits suivants :

- 1 départ pour les CTA des magasins, les CTA des locaux pour le public et le traitement des collections, des armoires de climatisation et des ventilo-convecteurs,
- 1 départ pour les CTA et les poutres climatiques, fonctionnant en change-over avec l'eau rafraîchie provenant de l'échangeur eau de puits.

> Le réseau d'eau rafraîchie (régime 18/23 °C) alimente, en demi-saison chaude, les équipements suivants :

- les 2 départs de planchers (rez-de-chaussée et R+8), fonctionnant en change-over avec le réseau chauffage,
- 1 départ poutres climatiques en change-over avec l'eau glacée en cas d'insuffisance,
- 1 départ CTA 5 pour le rafraîchissement de la salle de conférence,
- 1 départ CTA 0 et 3 pour le rafraîchissement de la salle de lecture et du hall d'accueil, fonctionnant en change-over avec l'eau glacée en cas d'insuffisance.



Image 21. Vue des deux thermo-frigo-pompes

Traitement d'air des magasins

Les magasins sont répartis en trois corps de bâtiment, de 6 étages pour les blocs A et C, et de 5 étages pour le bloc central B. Dans chaque bloc on trouve trois magasins par étage ayant chacun une surface de 180 m².

La température doit être maintenue stable avec un gradient maximum de 0,5 °C par 24 heures, dans une plage comprise entre 16 °C et 24 °C. Ces conditions doivent être garanties par le chauffage de l'air recyclé, ainsi que par la gestion de l'air neuf. Ce dernier peut être chauffé, réglé en mode free-cooling, mis à l'arrêt, puis rafraîchi en cas d'élévation de la température, avant d'être introduit dans le réseau de recyclage de chaque bloc de magasins, en amont de la CTA recyclage.

L'hygrométrie des magasins doit être maintenue stable avec un gradient maximal de 1 % par 24 heures, dans une plage comprise entre 40 % et 60 %. Le minimum de 40 % sera assuré par l'humidification de l'air neuf ; le maintien de l'HR en dessous de la valeur de 60 % doit être obtenu soit en augmentant la température ambiante des magasins avec un seuil limite de 24 °C-25 °C, soit par la réduction, voire l'arrêt de la CTA air neuf. En cas de dérive, il y a possibilité de relancer cette CTA et de déshumidifier l'air neuf à l'aide de la batterie froide.

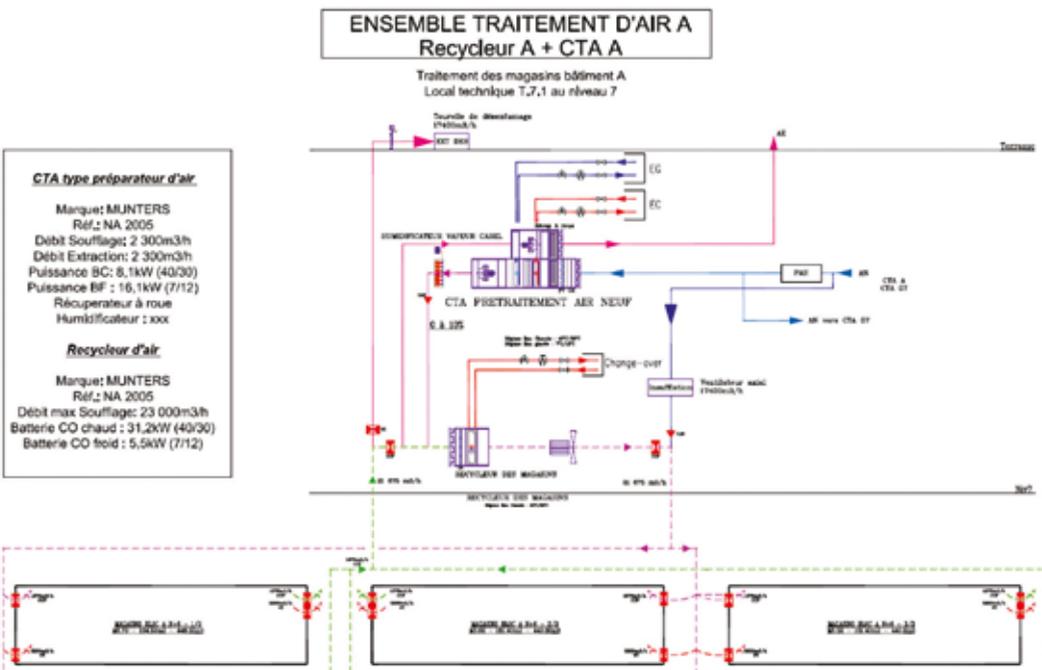


Figure 24. Schéma aéraluque du traitement d'air d'un bloc de magasins (bloc A)

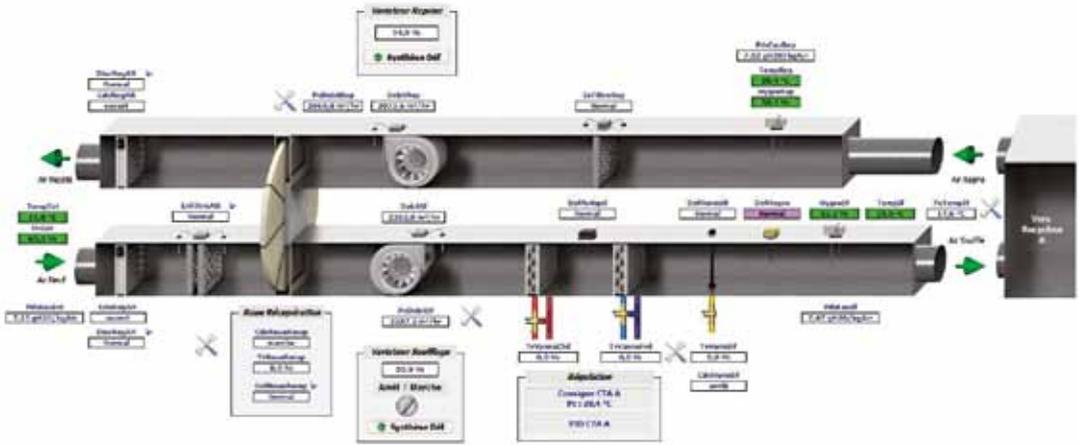


Figure 25. CTA A Air neuf des magasins du bâtiment A

Les 3 CTA de prétraitement de l'air neuf sont identiques. Elles comprennent :

- > une préfiltration (efficacité gravimétrique G4) et une filtration (efficacité opacimétrique F7) ;
- > une roue de récupération d'énergie entre l'air rejeté et l'air neuf fonctionnant selon l'écart de température :
 - si $\Delta T < 5\text{ °C}$, la roue est à l'arrêt,
 - si $\Delta T > 10\text{ °C}$, la roue fonctionne à 100 % ;
- > deux ventilateurs centrifuges à débit variable, asservis entre eux ;
- > une batterie chaude pour le chauffage de l'air ;
- > une batterie froide pour le refroidissement et la déshumidification ;
- > un humidificateur à vapeur.

Elles assurent les fonctions suivantes :

- > le renouvellement d'air compris entre 0 et 0,3 vol/h ; ce débit variable est diminué progressivement lorsque le poids d'eau extérieur atteint une valeur limite réglée à $9,5\text{ g}_h/\text{kg}_{as}$, jusqu'à l'arrêt complet lorsqu'il atteint $11\text{ g}_h/\text{kg}_{as}$. Le ventilateur est relancé progressivement lorsque les valeurs de température et/ou d'HR des magasins dépassent les seuils limites ($T > 25\text{ °C}$ et $HR > 60\%$). En dernier recours, cette relance est associée à l'ouverture de

la batterie froide, afin de refroidir et/ou déshumidifier l'air neuf ;

- > la régulation de la température : la batterie chaude permet de maintenir une consigne de température de soufflage équivalente à la température de soufflage de la CTA de recyclage d'air. La tolérance de cette température de consigne est limitée à $\pm 1\text{ °C}$. L'ouverture de la vanne froide ne viendra en secours que lorsque la moyenne de la température des magasins atteint la valeur de 25 °C ;
- > la régulation de l'humidification est autorisée lorsque l'HR moyenne de reprise des magasins est inférieure à 40 %. Elle permet de maintenir une HR minimum de 40 % au soufflage de l'air neuf, par action progressive sur l'humidificateur à vapeur en hiver ; une limite haute de soufflage est paramétrée à 50 % d'HR ;
- > la régulation de la déshumidification est autorisée en dernier recours, lorsque l'HR moyenne de reprise des magasins est supérieure à 60 %. La déshumidification n'est assurée qu'en secours et régule un poids d'eau fixe au soufflage, par action sur la vanne de la batterie froide.

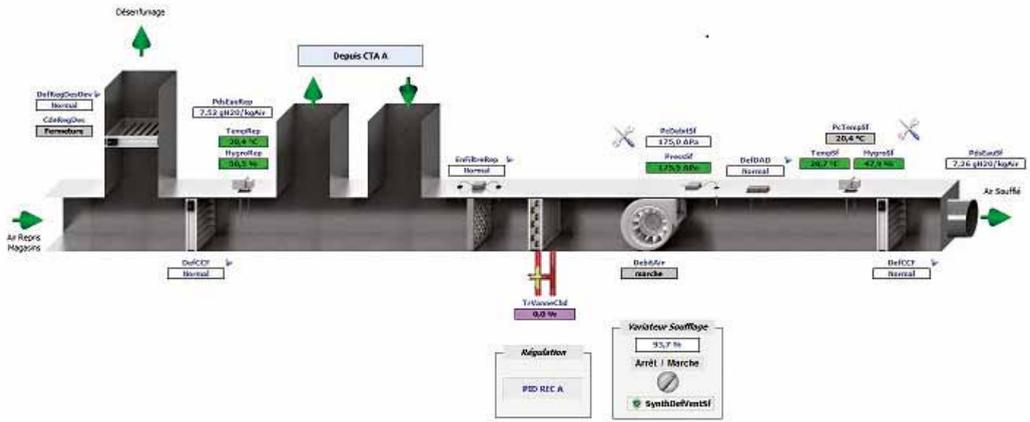


Figure 26. CCTA de recyclage d'air des magasins du bâtiment A

Les 3 CTA de recyclage d'air des magasins sont identiques. Elles permettent de ventiler les magasins et les réseaux aérauliques peuvent être utilisés pour le désenfumage.

Elles assurent les fonctions suivantes :

- > la ventilation avec un brassage de 3 vol/h par l'intermédiaire d'un ventilateur centrifuge ;
- > les 2 piquages en amont de cette CTA servent à rejeter environ 10 % du débit d'air de la CTA recyclage et à le remplacer par un débit d'air neuf équivalent, après avoir été prétraité dans la CTA d'air neuf ;
- > le réchauffage de l'air des magasins, assuré par une batterie chaude. La consigne de température de soufflage évolue entre 16 °C et 25 °C, avec une correction qui dépend de la température de reprise moyenne des magasins sur les 24 dernières heures. L'écart entre cette température de reprise et son point de consigne est limité à 0,5 °C afin de répondre aux contraintes du CCTP. À ce titre, une loi de température de soufflage en fonction de l'écart consigne/température de reprise a été adoptée.

Réseaux aérauliques et diffusion de l'air

La distribution aéraulique d'une partie des magasins des trois blocs est l'une des particularités de ce site :

- > les 2/3 des murs extérieurs des magasins sont habillés d'une paroi isolante légère formant une double peau. Entre ces deux complexes se trouvent des vides d'environ 0,70 m utilisés comme plénums de soufflage. C'est ainsi que l'air traité par les CTA des magasins est soufflé dans les vides de la double peau, les mettant en légère surpression ; dans les parois en béton de chaque magasin, on trouve des ouvertures d'environ 0,50 m x 0,50 m permettant de transférer à basse vitesse l'air traité du plénum vers les magasins. Les reprises d'air sont positionnées sur les murs opposés du magasin et sont également constituées d'ouvertures dans la structure béton d'environ 0,50 m x 0,50 m. L'air est ensuite acheminé jusqu'aux CTA par un réseau aéraulique de reprise d'air ;
- > les réseaux aérauliques de l'autre tiers des magasins (côté ouest) sont réalisés de façon traditionnelle, avec des gaines de soufflage et de reprise raccordées sur les CTA de recyclage. Les entrées et sorties d'air sont identiques aux autres magasins et constituées de plusieurs ouver-

tures dans la structure béton, d'environ 0,50 m x 0,50 m.

Traitement d'air des magasins spéciaux

Les différents magasins abritant des documents plus fragiles et demandant des conditions climatiques différentes des magasins standards, se trouvent implantés aux niveaux 2 et 7. Les traitements d'air de ces espaces sont les suivants :

Au niveau 2 se trouvent :

- > 1 magasin photos, qui est traité par une armoire de climatisation à détente directe ;
- > 5 armoires réfrigérées pour la conservation des supports photos, films et multi-média.

Au niveau 7 (dans le bloc C) se trouve un magasin de photos, de films et supports vidéo, dont les conditions doivent être de $18\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, et entre 30 % et 50 % d'HR.

La salle de lecture

Cette salle de 600 m², d'une hauteur sous plafond d'environ 6 mètres, peut accueillir 150 lecteurs. Elle est traitée en base par un plancher chauffant/rafraîchissant et, pendant les heures de présence des lecteurs, l'ambiance est climatisée par une CTA qui assure les fonctions de renouvellement d'air, de ventilation par déplacement d'air, de chauffage, d'humidification adiabatique grâce à des laveurs d'air et de rafraîchissement par le circuit d'eau de puits, et en cas d'insuffisance, par le réseau d'eau glacée.

Le débit d'air hygiénique de cette CTA est variable en fonction d'une sonde CO₂.

Le hall d'accueil

Ce hall est traité en base par un plancher réversible (chauffage/rafraîchissement). Une CTA double flux assure les mêmes fonctions que la CTA de la salle de lecture.

La salle de conférence

Cet espace est prévu pour recevoir 120 personnes. Son traitement climatique est assuré par une CTA dont le fonctionnement est identique à celui de la salle de lecture.

Les locaux administratifs

Les bureaux, situés dans la partie supérieure du bâtiment, sont traités en température par un système de poutres froides réversibles installées en faux plafond. La ventilation est assurée par une CTA double flux qui prépare l'air primaire à une température constante modifiable suivant les saisons. Les poutres froides corrigent la température ambiante de chaque bureau.

Évolutions climatiques des magasins suite à l'emménagement des collections

Le déménagement a débuté en mars 2014 et s'est déroulé en deux étapes :

Du 3 mars au 25 juin 2014

Déménagement des documents historiques, provenant d'un bâtiment humide et dépourvu de chauffage, soit environ 8 magasins représentant 9 km linéaires de rayonnage. La période en sortie d'hiver est celle où la teneur en eau dans les documents est la plus faible et cela d'autant plus que l'absence de chauffage en limite la capacité d'adsorption. Il n'y a donc pas eu d'élévation intempestive de l'hygrométrie dans les magasins, le printemps ayant, qui plus est, bénéficié d'une faible pluviométrie jusqu'à la fin juin.

Du début avril jusqu'à la fin juillet 2014

Déménagement des sections modernes provenant d'une ancienne usine dépourvue de chauffage et plutôt saine, avec des élévations importantes de la température en été. Les variations d'HR dans les magasins cibles ont été importantes, mais sans élévation excessive en raison de la période choisie pour le déménagement. Il convient de noter que le mois de juillet 2014 a été particulièrement pluvieux.

Évolutions climatiques des magasins

Le suivi du climat des magasins est réalisé par deux types de sondes situées :

- > au niveau de la reprise d'air. Ce sont elles qui pilotent la régulation ;
- > au milieu des magasins.

Evolution du climat au niveau des sondes de reprise d'air

D'après les enregistrements effectués au niveau des sondes de reprise d'air représentant la valeur moyenne des magasins pour chaque bloc, on constate :

En août et septembre 2014, il y a eu une élévation généralisée de l'HR dans les magasins, avec des dépassements de seuils limites, par exemple :

- > dans le bloc A, fin août : $T = 25\text{ °C}$
 $HR = 65\%$ et poids d'eau = $12\text{ g}_h/\text{kg}_{as}$;
- > dans le bloc C, fin août : $T = 24,5\text{ °C}$
 $HR = 59\%$ et $HA = 10,8\text{ g}_h/\text{kg}_{as}$.

Si les températures étaient globalement assez stables, ce n'était pas le cas de l'hygrométrie dont l'amplitude des variations aux reprises d'air des magasins pouvait atteindre 12 % sur une période de 2 ou 3 jours. Le poids d'eau était également instable, avec des amplitudes pouvant dépasser $3\text{ g}_h/\text{kg}_{as}$.

L'hiver 2014, la température est restée élevée (entre 20 °C et 23 °C). Cela a contribué à faire baisser l'HR en dessous du seuil des 40 % (32 % constatés fin décembre 2014).

Durant l'été 2015, la température se situait autour de $24\text{ °C}/25\text{ °C}$, avec une pointe à $25,6\text{ °C}$ durant la deuxième quinzaine de juillet. L'HR n'a pas dépassé les 57 %.

En hiver 2015, il a été décidé de laisser descendre naturellement la température des magasins en diminuant le chauffage au mois de septembre. Durant les mois d'octobre et de novembre, la température est restée comprise entre 19 °C et 22 °C , et l'HR, bien que toujours instable, est restée inférieure à 57 %.

On a pu constater que les valeurs de température, d'HR et de poids d'eau enregistrées au niveau des sondes de reprise d'air de chaque bloc (moyennes de 18 magasins) ne sont pas stables et présentent parfois des variations difficilement compréhensibles, alors que la masse du papier des 18 magasins aurait dû atténuer les amplitudes de l'hygrométrie.

Evolution du climat dans l'ambiance des magasins

En reprenant les enregistrements à partir des sondes d'ambiance des magasins (courbes d'enregistrement ci-après), on constate les variations suivantes :

En janvier et février 2015, l'HR oscille entre 32 % et 40 % avec des amplitudes de 6 à 7 % sur 3 jours (Figure 27) et la température, entre $17,8\text{ °C}$ et 21 °C (Figure 28) sauf pour le magasin n°4.40 dans lequel elle est comprise entre $22,1\text{ °C}$ et $23,3\text{ °C}$.

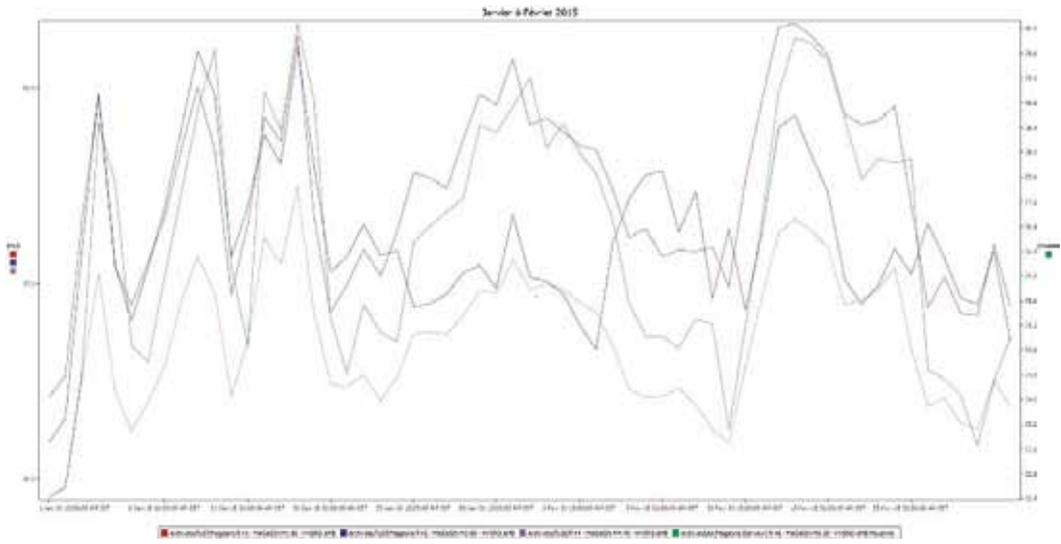


Figure 27. Courbes d'HR dans quatre magasins (R+1, R+2, R+4, et R+6) entre janvier et février 2015

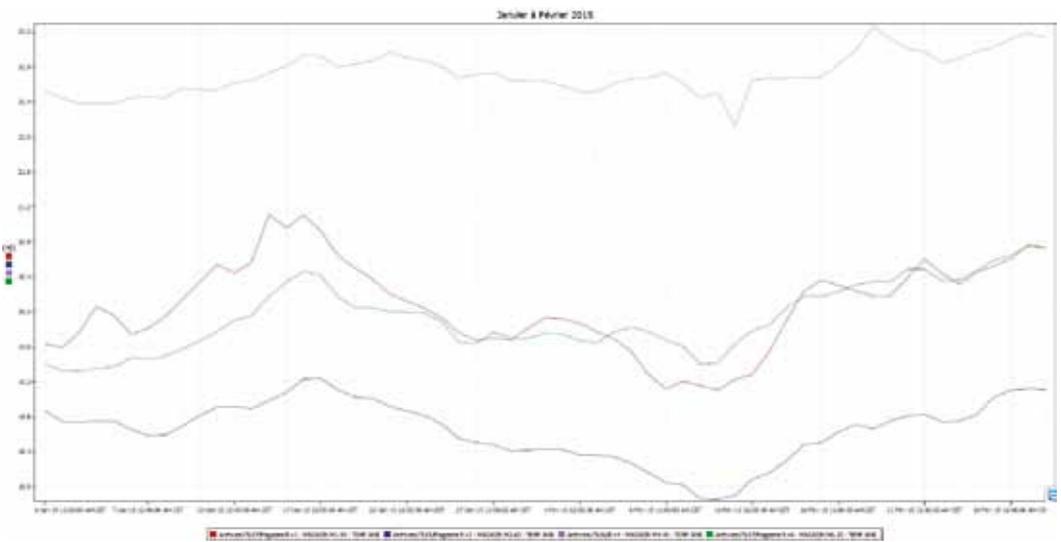


Figure 28. Courbes de température dans quatre magasins (R+1, R+2, R+4, et R+6) entre janvier et février 2015

En juillet et août 2015

> L'HR oscille entre 41 % et 50 % avec des amplitudes entre 6 % et 8 % sur 3 jours (Figure 28), et la température, entre 22,7 °C et 26,3 °C (Figure 29). Au cours de la première quinzaine de juillet 2015, la température de certains magasins a dépassé 25 °C, lorsque les températures extérieures dépassaient parfois 32 °C.

> Les valeurs de la Figure 30 (vue instantanée des conditions de température et d'HR le 6 juillet 2016 à 9h 45), peuvent être résumées ainsi :

- Zone A : 18 °C < T < 22,6 °C et 42,9 % < HR < 49,7 %

Les températures les plus élevées se situent dans les étages inférieurs,

- Zone B : 18,6 °C < T < 19,7 °C et 43,3 % < HR < 48,1 %

Les températures sont globalement très stables,

- Zone C : 18,5 °C < T < 20,4 °C et 38,2 % < HR < 45,7 %.

Pour cette période estivale où le climat extérieur était très doux, les conditions climatiques instantanées dans les magasins semblent tout à fait satisfaisantes, mais les enregistrements réalisés sur l'ensemble de cette période montrent des variations d'hygrométrie et des pics de température importants. Remarquons que les variations des conditions climatiques relevées en milieu de magasin sont tout à fait comparables à celles relevées au niveau de la reprise d'air.

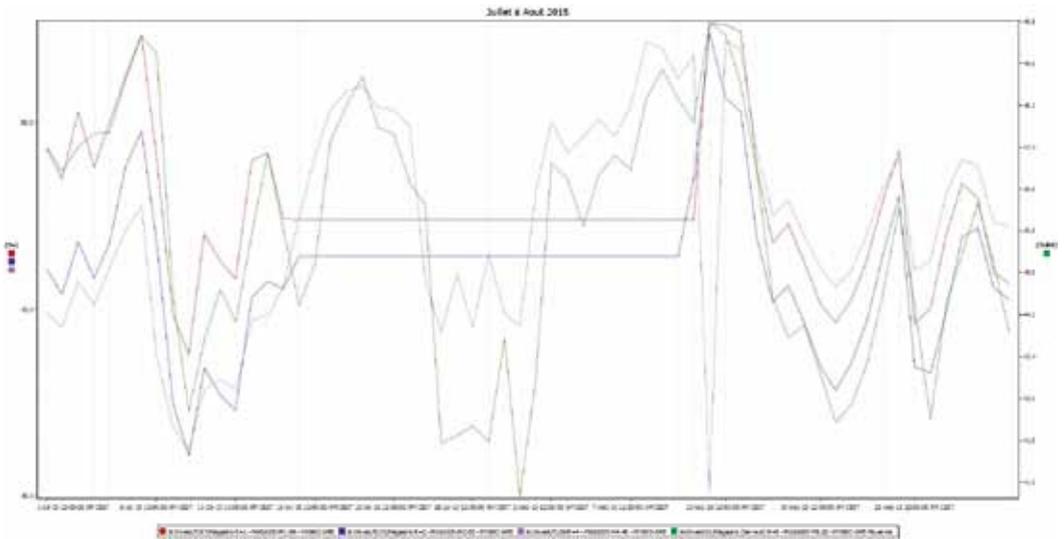


Figure 29. Courbes d'HR dans quatre magasins (R+1, R+2, R+4, et R+6) entre juillet et août 2015

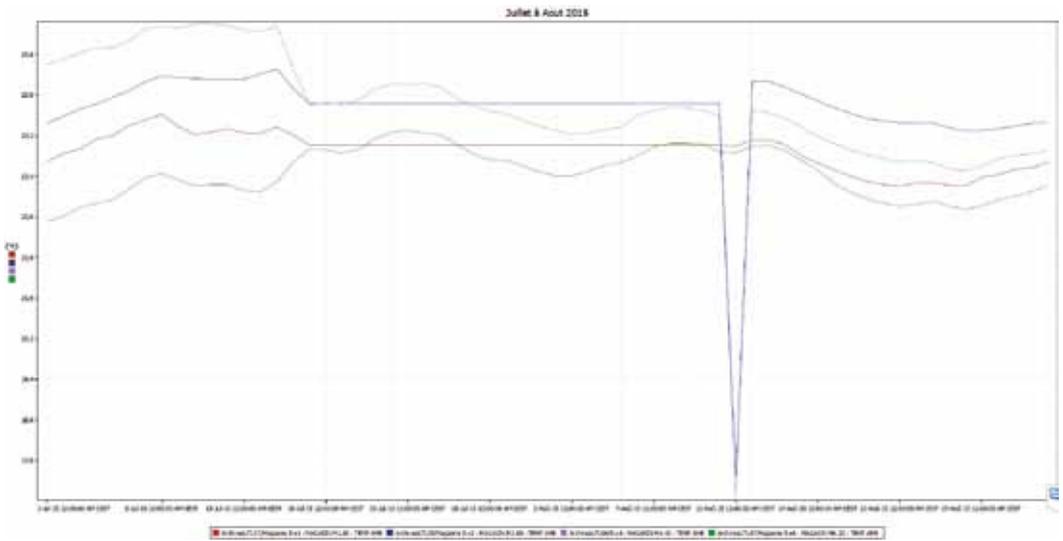


Figure 30. Courbes de température dans quatre magasins (R+1, R+2, R+4, et R+6) entre juillet et août 2015



Figure 31. Mesures instantanées de température et d'HR dans les 50 magasins

5.3.5 Les consommations d'énergie

Les productions de chaud et de froid étant assurées par des TFP, il n'y a donc que des consommations d'électricité.

Pour la période comprise entre octobre 2014 et septembre 2015, la consommation globale d'électricité s'élève à 1 108 MWh, soit un ratio de $1\ 108\ \text{MWh} / 13\ 783\ \text{m}^2 = 80\ \text{kWh/m}^2$.

Sur ce site plus récent, on dispose de sous-comptages d'énergie qui permettent de distinguer les consommations CVC par locaux techniques et les consommations d'électricité du bâtiment (éclairage, bureau-tique, ascenseurs...).

La répartition des consommations électriques s'établit comme suit :

- > pour les équipements électriques hors CVC : consommation = 555 MWh ;
- > pour toutes les installations techniques CVC : consommation = 553 MWh.

A partir des sous-comptages de la production d'énergie en sortie des évaporateurs et des condenseurs des TFP, on obtient les valeurs suivantes :

- > production de froid :
consommation = 764 MWh ;
- > production de chaleur :
consommation = 536 MWh.

Soit un total de production d'énergie de 1 300 MWh.

La consommation d'électricité, uniquement pour les 2 machines TFP, est de 250 MWh, à laquelle il convient de rajouter les consommations électriques des pompes du puits et de l'utilisation directe de l'eau rafraîchie, que l'on estime à 50 % de la consommation du local CVC 1 (hors TFP), soit 39 MWh.

Avec une consommation approchée de 289 MWh d'électricité, l'énergie produite par les machines est de 1 300 MWh, ce qui représente un Coefficient de Performance énergétique des TFP : $\text{COP} = 4,5$.

Ainsi, pour 1 kWh électrique consommé, on produit 4,5 kWh d'énergie en moyenne annuelle.

5.3.6 Commentaires

Les conditions de conservation

Ce site est en fonctionnement depuis mars 2014 et les premiers enregistrements climatiques de magasins analysés ne sont pas stables. De plus, les limites basses d'HR en hiver et les limites hautes de température ont été plusieurs fois dépassées au cours des étés 2014 et 2015.

Si, pendant environ 90 % du temps, les installations permettent de tenir le climat dans des limites imposées par le CCTP (entre 16 °C et 24 °C et entre 40 % et 60 % d'HR), les variations enregistrées au niveau des reprises d'air en revanche dépassent la plupart du temps les valeurs de consigne (0,5 °C par 24 heures et 1 % d'HR par jour). Cette situation était due au manque d'étanchéité des portes d'accès pompier, placées dans la double peau du plénum. Ce problème a été résolu en octobre - novembre 2015.

Les enregistrements de novembre et décembre 2015 sont nettement plus stables, avec toutefois des conditions extérieures assez clémentes.

Le fait que le traitement de l'hygrométrie et le rafraîchissement soient assurés uniquement sur l'air neuf doit permettre de tenir un climat satisfaisant durant les régimes de croisière. Par contre, lors de périodes estivales chaudes et humides, il sera certainement difficile d'empêcher les dérives.

Cette installation de traitement d'air ne possède pas de surpuissance capable de répondre à des variations climatiques importantes. Lors des déménagements, les dérives climatiques ont pu être amorties grâce à la période favorable (à partir de mars) et au climat sec du printemps 2014.

Le fonctionnement des installations CVC des magasins

Il convient de noter que les points développés dans le paragraphe « traitement d'air des magasins » sont extraits des analyses fonctionnelles initiales des installations CVC, et qu'il est possible que des modifications de programme aient été réalisées lors des mises en service ou lors de mises au point.

L'été 2014, comme l'été 2015, il a fallu faire fonctionner les batteries froides des CTA air neuf en marche forcée, afin de combattre les dérives de température et d'HR. Les enregistrements d'ouverture des vannes de régulation d'eau glacée sur la période de juillet et août 2015 montrent bien que les batteries froides ont fonctionné à 100 % de leur puissance la première quinzaine de juillet, puis entre 50 % et 100 % jusqu'au 30 août. Ce point est d'ailleurs confirmé par l'enregistrement de la température en sortie de la CTA air neuf qui était comprise entre 11 °C et 15 °C en juillet et août 2015.

Il semble qu'il y ait eu plusieurs causes à l'instabilité d'HR constatée en 2014 et 2015 :

- > **l'absence d'étanchéité** au niveau des joints des portes d'accès pompiers donnant dans les plénums de soufflage a certainement contribué à l'instabilité du climat dans les magasins ; les joints ont été remplacés depuis octobre 2015 ;

- > **le mauvais positionnement** des sondes de température et d'hygrométrie placées sur les gaines de reprise d'air des magasins qui pilotent les régulations. Celles-ci

se trouvent en effet implantées juste au niveau de la jonction de la gaine d'introduction d'air neuf (non traité en hygrométrie une grande partie de l'année) ; elles pourraient donc être influencées par ce dernier et engendrer des phénomènes de pompage. Cela pourrait expliquer les valeurs anormalement instables constatées sur les enregistrements des reprises d'air générales des magasins, alors que les relevés effectués dans les magasins sont plutôt stables ;

- > **des cycles inadaptés** sur l'installation de déshumidification. Lorsqu'il y a une élévation d'HR dans les magasins, ces cycles consistent d'abord en une montée de température, puis en un fonctionnement de la CTA air neuf en mode réduit et enfin, en un arrêt complet de cette dernière. La CTA n'est relancée avec sa fonction déshumidification qu'en dernier ressort (lorsque l'HR des magasins dérive au-delà de la limite de 60 %), alors qu'elle devrait être sollicitée dès le début de la dérive de l'HR dans les magasins.

De plus, le fait de monter la température pour baisser l'HR n'est pas sécurisant pour les collections, car le poids d'eau dans les magasins ne baisse pas pour autant.

Cette programmation a été peut-être choisie pour limiter les consommations d'énergie, mais cela se fait au détriment de la stabilité de l'hygrométrie.

Les consommations d'énergie

Si l'on prend uniquement la production d'énergie chauffage des TFP, afin de la comparer aux consommations de gaz et de chauffage urbain des autres sites, on obtient le ratio suivant : la consommation de chauffage rapportée au m² de surface utile est de $535\,600 \text{ kWh} / 13\,783 \text{ m}^2 = 38,9 \text{ kWh/m}^2$.

La maintenance CVC

La société assurant la maintenance est titulaire d'un marché « multi-techniques », qui couvre l'entretien préventif et curatif des installations CVC désenfumage, plomberie et électricité, ainsi que les lots du second œuvre.

Les prestations de la partie CVC comprennent :

- > le responsable du site estimé au ¼ de temps ;
- > la présence d'un technicien spécialisé 5 jours sur 7 ;
- > 2 passages par an d'un frigoriste spécialisé sur les TFP (en sous-traitance) ;
- > une assistance et une maintenance d'une société spécialisée en GTB et régulation, également en sous-traitance.

Enfin, il convient de préciser que le Département du Rhône a missionné une assistance à maîtrise d'ouvrage pour la gestion de l'énergie, du marché de maintenance, et pour assurer le suivi du fonctionnement des équipements en génie climatique de ce site.



5.4 Annexe des Archives départementales de la Marne à Reims

Image 22. Annexe des Archives départementales de la Marne à Reims

5.4.1 Présentation du projet

En 2007, le Département de la Marne a décidé de lancer le projet de reconstruction du bâtiment annexe des Archives départementales sur un terrain situé en face du précédent, sur le campus universitaire des sciences de la ville de Reims.

L'assistance à maîtrise d'ouvrage a été confiée au cabinet In extenso. C'est le cabinet d'architectes Hamonic et Masson qui a assuré la maîtrise d'œuvre de ce projet. Les études en génie climatique ont été assurées par le bureau d'étude SIBAT, et la réalisation des travaux du lot CVC par l'entreprise Axima Seitha.

Le chantier s'est déroulé entre 2011 et 2013, avec une ouverture au public en 2014. Les collections ont été déménagées dans le nouveau site à partir de novembre 2013.

Cet édifice est composé de deux entités :

- > un bâtiment de conservation (R+3), regroupant 16 magasins, doté d'une bonne inertie thermique ;
- > les espaces du rez-de-chaussée regroupant les espaces accessibles au public, les locaux du personnel et les bureaux. Ces espaces sont réalisés avec de larges baies vitrées et ont une faible inertie thermique.

5.4.2 Le projet en quelques chiffres

Le bâtiment et ses magasins

- > La surface hors œuvre nette (SHON) est de 4 989 m².
- > La surface utile est de 4 049 m² dont 118 m² pour le logement de fonction (extrait du permis de construire).
- > La surface des magasins est de 2 910 m², ce qui représente 71 % de la surface du site ; soit au total 16 magasins qui se répartissent de la manière suivante :
 - six magasins à rayonnages mobiles,
 - sept magasins à rayonnages fixes,
 - un magasin grands formats (cartes et plans),
 - deux magasins spéciaux pour les documents photographiques et audiovisuels.
- > La capacité de conservation est de 18 km linéaires.

Les équipements CVC

- > Conditions à maintenir dans les magasins :
 - température : entre 16 °C et 23 °C avec une variation maximum de 1 °C/jour et 2 °C/semaine,
 - HR : entre 40 % et 57 % avec une variation maximum de 5 % par semaine.
- > Conditions à maintenir dans les magasins spéciaux :
 - température : 5 °C ± 2 °C,
 - HR : 35 % ± 5 %.
- > Puissance de la production de froid : 97 kW.
- > Puissance de la production de chaleur : 230 kW.
- > Débit de la CTA air neuf du bâtiment des magasins : 750 m³/h (50 m³/h par magasin).
- > Caractéristiques de chaque armoire de traitement d'air (ACL) :
 - débit d'air : 1 500 m³/h,
 - puissance de la batterie froide à un régime d'eau glacée de 0/6 °C : 4,4 kW,
 - puissance de réchauffage en post-dés-humidification : 3,5 kW,
 - puissance d'humidification : 1 kg_{vapeur}/h,

- renouvellement d'air : 0,10 vol/h (magasin vide) soit 50 m³/h par magasin,
- brassage d'air : environ 3 vol/h.

5.4.3 Description de l'enveloppe du bâtiment

Le bâtiment des magasins est construit comme une tour de 4 niveaux (R+3) et possède une bonne inertie thermique.

Les murs extérieurs sont réalisés en voile de béton de 20 cm d'épaisseur, avec une isolation par l'extérieur en laine de roche de 16 cm, munie d'un pare-vapeur. L'ensemble est habillé d'un bardage en aluminium.

Les planchers, d'une épaisseur de 30 cm, sont réalisés en dalles précontraintes alvéolaires et les murs de séparation des magasins en béton banché.

Les espaces du bâtiment d'accueil sont recouverts d'une toiture végétalisée.

Le bâtiment des magasins est isolé par l'extérieur avec un toit-terrasse recouvert d'un complexe d'étanchéité et d'une couche de gravillon.

Les magasins sont dépourvus de fenêtres, à l'exception d'un châssis « accès pompier » implanté dans un des magasins, à chaque niveau. Les parois vitrées des espaces du rez-de-chaussée sont réalisées en châssis aluminium muni de verre double vitrage. La hauteur sous-plafond des magasins est de 2,70 m.

5.4.4 Description technique du traitement de l'air

Les équipements sont prévus pour assurer le chauffage des locaux du personnel et des bureaux, le traitement d'air des magasins, des espaces de travail, et des espaces accessibles au public.

Les locaux abritant des documents d'archives sont traités en température et en hygrométrie.

Production de chaleur

Le chauffage est assuré par deux chaudières gaz à condensation d'une puissance unitaire de 115 kW (dont 50 kW pour une future extension). A partir de cette chaufferie, cinq réseaux, avec leur propre régulation, alimentent en eau chaude les différents émetteurs (radiateurs, CTA, armoires de traitement d'air...).

Production d'eau glacée

Un groupe de production d'eau glacée à condenseur à air, implanté en terrasse, alimente les batteries froides :

- > de la CTA de la salle d'exposition/conférence ;
- > des armoires de traitement d'air des magasins.

Ce groupe possède deux circuits frigorifiques indépendants et assure la production d'eau glacée à un régime de température de 0/6 °C.

Traitement d'air neuf des magasins

L'air neuf introduit dans chaque magasin est préparé dans une CTA qui assure les fonctions de chauffage, filtration et ventilation.

L'air extérieur est réchauffé à une température minimale de 16 °C quelle que soit la saison. En été, il entre aux conditions extérieures. Un réseau aéraulique achemine l'air neuf prétraité (préchauffé et filtré) jusqu'aux armoires de traitement d'air des magasins et jusqu'à la CTA exposition/conférence.

Armoires de traitement d'air des magasins ou armoires de climatisation (ACL)

L'air ambiant de chaque magasin est traité par une armoire de traitement d'air à eau glacée (ACL). Ces armoires sont au nombre de 15 et sont implantées dans des placards techniques adossés aux magasins donnant dans les circulations à chaque niveau du bâtiment ; cette configuration permet d'effectuer la maintenance et les dépannages depuis les couloirs sans pénétrer dans les magasins d'archives.

Chaque ACL assure les fonctions de filtration, ventilation, chauffage, refroidissement, déshumidification et humidification.

L'air neuf provenant de la CTA est introduit dans chaque placard au niveau de la reprise d'air de l'ACL.

La régulation est assurée par l'automate intégré à chaque ACL. Une sonde placée sur la reprise d'air des magasins mesure la température et l'HR et envoie les valeurs aux régulations, qui sollicitent :

- > les batteries chaudes ou froides pour la gestion de la température ;
- > la batterie froide ou l'humidificateur à vapeur pour la gestion de l'hygrométrie.

Les paramètres des automates des ACL (valeurs des sondes, seuils limites, alarmes, signalisations...) sont repris par la GTB du bâtiment.

Diffusion de l'air

L'air est distribué dans chaque magasin par un réseau de gaines cheminant en plafond des circulations ; des diffuseurs à fort taux d'induction soufflent cet air parallèlement aux rayonnages.

La reprise se fait à l'opposé du soufflage, par une grille de grande dimension, placée au dos du placard technique où se trouve l'ACL.

Traitement d'air des magasins spéciaux

Les magasins de conservation de documents spéciaux (photographies, films, multimédia, bandes magnétiques...) sont traités par des unités plafonnrières à détente directe associées à des déshydrateurs à adsorption.

Les autres traitements d'air

La salle d'exposition/conférence est traitée par une CTA assurant les fonctions de filtration, ventilation, chauffage, refroidissement, déshumidification et humidification. Un système de basculement par registres motorisés permet de fonctionner soit en mode exposition, soit en mode conférence.

La salle pédagogique et la salle de lecture sont chacune traitées par une CTA double flux, avec récupération d'énergie et une batterie électrique en complément de chauffage.

5.4.5 Les conditions climatiques des magasins

Le suivi des conditions climatiques dans les magasins est assuré d'une part, par l'équipement GTB du site et, d'autre part, par un équipement de capteurs indépendants des installations CVC géré par le personnel des archives.

Pour chaque magasin, les valeurs de température et d'HR sont stockées et l'édition de courbes d'enregistrement permet de suivre l'évolution climatique.

Phase de mise en service des ACL

Les Figures 32 et 33 présentées ci-dessous correspondent à la mise en service des installations CVC de 4 magasins vides, au cours de la dernière semaine de septembre 2013. On constate l'efficacité des ACL, qui ont stabilisé le climat des magasins en 48 heures, avec une amplitude de 0,5 °C pour la température et 3 % pour l'HR.

Ces installations ont ensuite fonctionné pendant trois mois sans documents, afin d'assainir les espaces en évacuant l'humidité contenue dans les maçonneries ; cette période a permis de contrôler le bon fonctionnement des équipements CVC.

Phase d'emménagement des collections

Les déménagements ont eu lieu en deux phases : d'abord de novembre à décembre 2013, puis de mars à avril 2014. Les conditions climatiques se sont équilibrées en une semaine dans la plupart des magasins, puis sont ensuite restées stables toute l'année et ce, quelles que soient les conditions climatiques extérieures.

Les enregistrements présentés ci-après (Figure 34) sont représentatifs des conditions climatiques observées dans les magasins durant la période du 13 avril au 18 mai 2015.

Les points de consigne de toutes les ACL étaient de 18 °C et 50 % d'HR.

Dans le magasin n° 108, la température évolue entre 17,2 °C et 17,8 °C, soit une amplitude de 0,6 °C sur 5 semaines. L'HR varie entre 52,5 % et 55 % soit une amplitude de 2,5 % pour la même période.

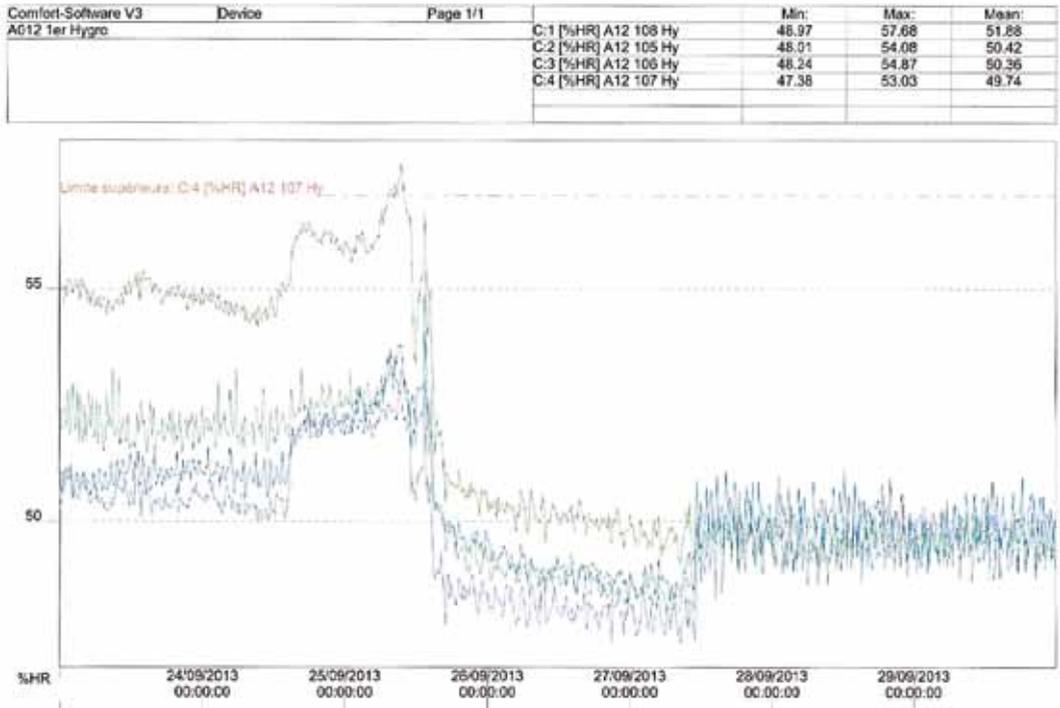


Figure 32. Évolution de l' HR dans quatre magasins lors de la mise en service des installations CVC

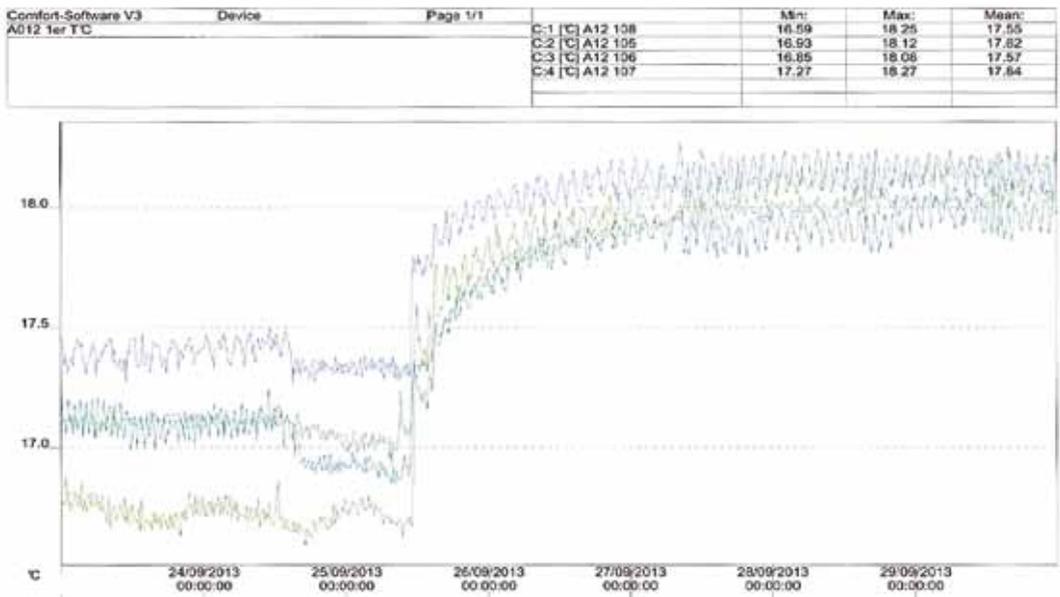


Figure 33. Évolution de la température dans quatre magasins lors de la mise en service des installations CVC

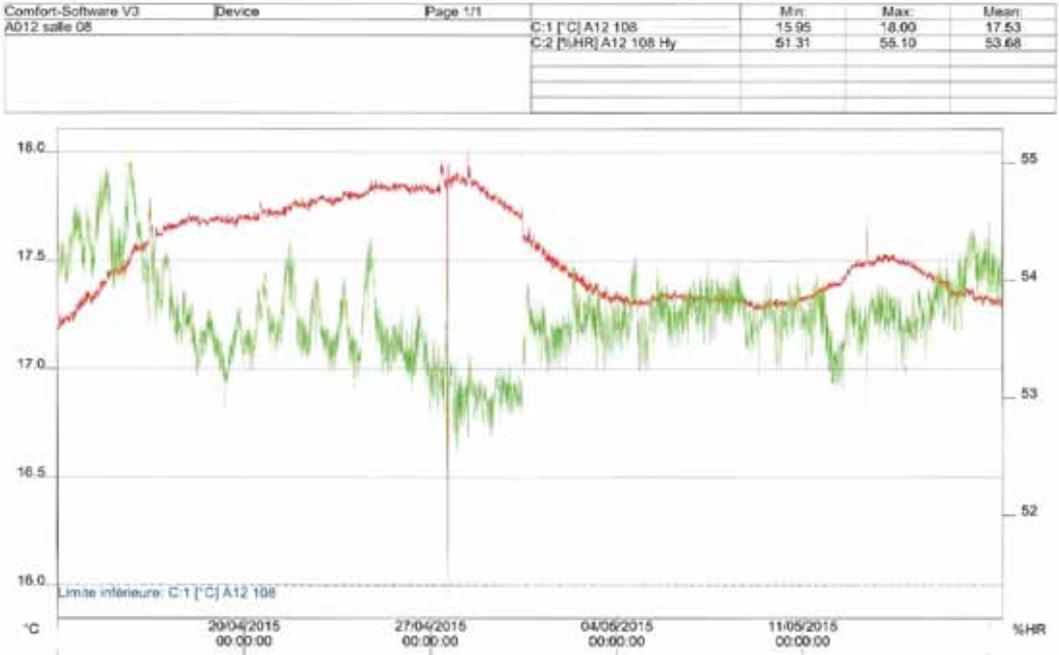


Figure 34. Évolution de la température et de l'HR dans le magasin 108 (période du 13 avril au 18 mai 2015)

5.4.6 Les consommations d'énergie

Chauffage

La consommation de chauffage rapportée au m² de surface utile est de :
 $537\,821 \text{ kWh} / 4\,049 \text{ m}^2 = 133 \text{ kWh/m}^2$ de surface utile.

Électricité

La consommation d'électricité rapportée au m² de surface utile est de :
 $441\,626 \text{ kWh} / 4\,049 \text{ m}^2 = 109 \text{ kWh/m}^2$ de surface utile.

Cette consommation regroupe l'ensemble des équipements électriques (éclairage, bureautique, appareils de levage, production de froid, et équipements CVC), car il n'est pas possible de séparer les consommations relevant strictement des installations de génie climatique.

Pour l'année 2014, la consommation globale (chauffage + électricité) s'élève donc à 979 447 kWh, soit un ratio de 242 kWh/m². Cette consommation d'énergie est très importante.

5.4.7 Commentaires

Régulation du climat intérieur

La grande stabilité du climat intérieur pendant tout la phase d'emménagement des collections et tout au long de l'année 2014 montre l'efficacité des installations et, en particulier, la grande capacité de déshumidification des ACL grâce à un régime d'eau glacée basse température (0/6 °C). Cette capacité sera encore plus importante, lorsque les consignes climatiques intérieures seront modifiées : température comprise entre 16 °C et 23 °C au lieu de 18 °C et HR comprise entre 45 % et 57 % au lieu de 50 %.

Les seules variations constatées proviennent du dysfonctionnement d'éléments constituant l'installation CVC : arrêt de l'ACL, panne de l'humidificateur, arrêt momentané de la production de froid.

En revanche, la consommation énergétique est très élevée pour l'année 2014. Celle-ci s'explique par les réglages effectués lors des mises en service impliquant en particulier l'assèchement de la maçonnerie et l'amortissement des apports d'humidité liés au déménagement des documents auquel il faut ajouter les nombreuses ouvertures de porte.

Par ailleurs, les réglages fixés à 18 °C et 50 % d'HR ont eu un impact très important sur les consommations d'énergie.

L'année d'ouverture ne peut donc être prise comme référence ; un véritable bilan énergétique ne pourra être réalisé qu'après une modification des paramétrages des régulations, tout en respectant les conditions climatiques des magasins, telles que définies au cahier des charges du lot CVC.

Parmi ces réglages, il est possible :

- > de faire glisser la température des magasins de façon très progressive, sur une année entre les valeurs prévues au CCTP (de 16 °C en hiver à 23 °C en été) ;
- > même remarque pour l'HR qui peut glisser entre 45 % et 57 % suivant les saisons ;
- > de remonter, en hiver, le régime d'eau glacée, de 0/6 °C à 5/10 °C ;
- > d'arrêter la CTA air neuf lorsque les conditions climatiques extérieures dépassent des seuils extrêmes en température et en poids d'eau ;
- > d'optimiser les paramétrages des régulations des ACL (réglages des bandes proportionnelles, des temps d'intégration...)

- > de remonter les conditions climatiques des magasins spéciaux :
 - température à 8 °C et 12 °C, au lieu de 5 °C \pm 2 °C,
 - HR à 40 % \pm 5 %, au lieu de 35 % \pm 5 % ;
- > de délester et contrôler l'air neuf des équipements traitant l'air des locaux autres que les magasins, en fonction des réels besoins (nombre d'occupants et temps d'utilisation).

Ces actions doivent être accompagnées d'un suivi rigoureux du climat des magasins.

La maintenance CVC

La maintenance est assurée par un prestataire, titulaire d'un contrat de type P2 simple, qui prend en charge la maintenance préventive et curative et les dépannages durant les jours ouvrés. La charge de maintenance est réalisée suivant le planning de maintenance préventive, en fonction des prestations prédéfinies dans les gammes de maintenance.

La présence d'une ACL par magasin ayant chacune son propre équipement interne, induit une charge de maintenance plus importante. Il semble qu'une augmentation de la fréquence des interventions permettrait de limiter les petites pannes constatées, qui occasionnent des variations climatiques ponctuelles dans les magasins. Les petites interventions et les pièces détachées sont facturées en dehors du contrat. La société de maintenance peut faire appel, dans le cadre de son contrat, à des sous-traitants pour les interventions sur le groupe froid, ou la GTB. Le service technique du département de la Marne assure la gestion et le suivi des prestations, en liaison avec les responsables du site des archives.

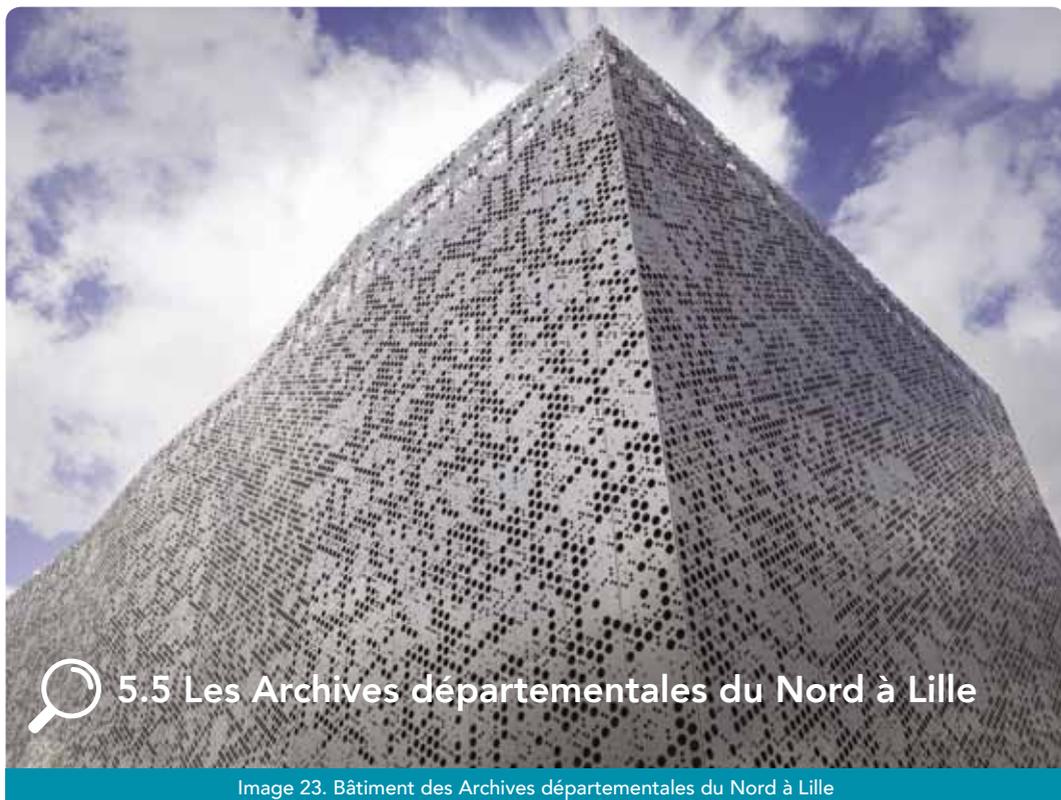


Image 23. Bâtiment des Archives départementales du Nord à Lille

5.5.1 Présentation du projet

Dans le Département du Nord, la maîtrise d'ouvrage a été assurée par la Direction Elaboration des grands projets (DEGP).

Cette opération de reconstruction-extension des magasins d'archives a été réalisée par les équipes désignées suite à un concours, à savoir :

- > la société NORPAC S.A., mandataire ;
- > le groupement d'architectes : Jérôme De Alzua Architecture Sarl, Zig Zag Architecture SARL, pour la maîtrise d'œuvre ;

Pour la partie génie climatique, la conception a été confiée à Betom Ingénierie – Cap terre et la réalisation au bureau d'étude intégré de NORPAC.

L'opération a été réceptionnée en août 2014. Toutefois le nouveau bâtiment regroupant les magasins des Archives départementales du Nord est en service depuis 2012. Ce site regroupe :

- > le bâtiment existant qui a été réhabilité entre 2002 et 2004. Il abrite des espaces de traitement des documents, les espaces accessibles au public, la salle de tri, les bureaux ;
- > le nouveau bâtiment qui regroupe les 49 magasins d'archives et des espaces de travail. Il fait l'objet d'un traitement climatique particulier puisqu'en effet, la maîtrise d'ouvrage avait pour ambition de construire un bâtiment à énergie positive tout en respectant le traitement de l'hygrométrie nécessaire à la conservation des documents d'archives.

Pour relever ce défi, une procédure « conception-réalisation » a été choisie. Ce marché particulier permet au maître d'ouvrage de confier simultanément la conception d'un ouvrage (études) et sa réalisation (exécution des travaux) à un groupement d'opérateurs (architecte et entreprise générale). Le recours à cette procédure est strictement encadré : celle-ci n'est applicable que lorsque les motifs d'ordre technique (pour les Archives départementales à Lille, il s'agit du traitement strict de l'hygrométrie) et les engagements sur l'amélioration de l'efficacité énergétique rendent nécessaire la participation de l'entreprise aux études de conception et à un engagement de résultat.

Pour se rapprocher de l'objectif « bâtiment à énergie positive », cette réalisation regroupe différentes technologies, telles que :

- > une hyper-isolation du bâtiment associée à une membrane pare-vapeur ;
- > une construction en maçonnerie lourde afin d'apporter une forte inertie thermique ;
- > une terrasse végétalisée ;
- > une centrale de traitement de l'air neuf avec une batterie chaude alimentée par la cogénération ;
- > un récupérateur d'énergie à roue entre l'air extrait et l'air neuf ;
- > un laveur d'air adiabatique pour le refroidissement de l'air ;
- > un laveur d'air adiabatique pour l'humidification ;
- > un déshumidificateur à adsorption ;
- > une cogénération, fonctionnant avec un moteur à huile végétale, pour la production de chaleur et le fonctionnement de l'alternateur (Image 24) ;
- > un alternateur pour la production d'énergie électrique de ces équipements ;
- > des capteurs photovoltaïques en terrasse (Image 25).

Tous ces équipements sont gérés par une GTB dans laquelle l'analyse fonctionnelle des automatismes et des régulations est complexe et nécessite un suivi par des spécialistes expérimentés.



Image 24. Vue de cogénération fonctionnant à l'huile de colza (local technique en sous-sol)



Image 25. Vue partielle des 300 m² de panneaux photovoltaïques sur la terrasse végétalisée

5.5.2 Le projet en quelques chiffres

Le bâtiment et ses magasins

- > La surface hors œuvre nette (SHON) du bâtiment de conservation est de 13 186 m² et de 3 788 m² pour l'ancien bâtiment, soit au total 16 974 m².
- > Surface utile totale du site : 14 000 m², dont 10 227 m² pour le bâtiment de conservation qui comprend 500 m² d'espaces de travail.
- > La surface des magasins est de 9 727 m² ; celle des autres espaces est de 500 + 2 430 = 2 930 m².
- > La surface utile occupée par les 49 magasins représente 77 % de la surface totale. Ils se répartissent de la manière suivante :
 - 25 magasins à rayonnages mobiles,
 - 22 magasins à rayonnages fixes,
 - 2 magasins spéciaux (grands formats, et photos/CD/supports informatiques),
 - 1 chambre froide et 2 petits magasins,
 - la hauteur sous plafond des magasins est de 2,55 m,
 - la capacité de rayonnage est de 81 km linéaires.

Les équipements CVC

- > Conditions à maintenir dans les magasins :
 - température : entre 16 °C et 24 °C, avec une variation maximale de 1 °C/jour et 2 °C/semaine,
 - HR : entre 40 % et 60 % avec une variation maximale de ±1 %/jour, et ±5 %/semaine.
- > En période de canicule, la température intérieure doit rester inférieure ou égale à 25 °C, avec une variation maximale de ±1 °C/jour.
- > Débit de la CTA air neuf du bâtiment des magasins : variable à 3 000 m³/h à 4 117 m³/h (magasins 3 000 m³/h et 1 117 m³/h pour les espaces de travail.
- > Renouvellement d'air : 0,12 vol/h, magasin vide.

- > Brassage d'air : il est actuellement de 1,1 vol/h ; il pourrait être augmenté en modifiant la programmation de la GTB.
- > Production de la cogénération :
 - chauffage : 19 kW de chaleur (régime eau chaude 65/45 °C),
 - électricité : 8 kW, par l'intermédiaire de l'alternateur entraîné par le moteur thermique du cogénérateur.

Caractéristiques des panneaux photovoltaïques :

- > 300 m² de panneaux photovoltaïques installés sur la terrasse végétalisée du bâtiment de conservation ;
- > puissance crête = 44 kW ;
- > production sur l'année 2014 = 41 774 kWh.

5.5.3 Description de l'enveloppe du bâtiment

La construction du bâtiment abritant les magasins d'archives est constituée :

Pour les murs extérieurs :

- > d'une structure en béton armé de forte épaisseur ;
- > d'un remplissage, entre les poteaux en béton, avec des éléments de maçonnerie en béton cellulaire (parpaings ytong) ;
- > d'un pare-vapeur très efficace constitué d'une bâche réfléchissante aluminium ;
- > d'une mousse de polystyrène d'une épaisseur de 22 cm ;
- > d'un espace de 5 à 10 cm dans lequel se trouve la structure d'un bardage métallique simple, rainuré ;
- > d'un habillage extérieur distant d'environ 2,5 m créant un espace de circulation des personnes ; cette enveloppe réalisée en panneaux d'aluminium ajourés est montée sur une structure métallique ;
- > les planchers des magasins de 35 cm d'épaisseur sont constitués de dalles alvéolaires avec chape et poutres intérieures, évitant toute retombée de poutre

en sous-face de plafond qui perturberait l'efficacité du brassage d'air dans les magasins.

La terrasse comprend :

- > une dalle en béton alvéolaire ;
- > une étanchéité montée sur un complexe isolant ;
- > une terrasse végétalisée constituée de gravier, de terre et de végétation basse.

Le bâtiment de conservation comprend

7 niveaux (R + 6), avec 7 magasins d'environ 200 m² par niveau chacun. Les magasins sont dépourvus de fenêtres mais leurs portes sont munies d'un oculus. Les murs de séparation entre magasins sont réalisés en parpaings traditionnels.

Les locaux techniques et les réseaux aérauliques sont implantés en sous-sol et en vide sanitaire.

La construction de ce bâtiment a été réalisée en première phase du chantier de façon à laisser un temps de séchage suffisant. Pour cette même raison, des éléments en béton préfabriqué en usine ont été préférés au coulage sur place.

5.5.4 Description technique des installations du nouveau bâtiment

Production de chaleur

Le site est raccordé sur le réseau urbain de la ville de Lille. A partir de la sous-station, les espaces suivants sont alimentés en chauffage :

- > le bâtiment ancien (chauffage par radiateurs) ;
- > les circulations et les espaces de travail du nouveau bâtiment ;
- > la CTA à dessiccation, en relève de la cogénération.

Les batteries à eau chaude de cette CTA sont alimentées par plusieurs sources de production de chaleur : une cogénération fonctionnant à l'huile de colza alimente le réseau de chauffage à eau chaude et est associée à un stockage d'eau chaude (2 ballons de 3 500 l).

Différents protocoles ont été mis en place :

- > si la température en sortie de stockage est inférieure à 55 °C, on utilise le chauffage urbain en relève ;
- > en cas d'arrêt de ce dernier, la production est alors assurée en secours par un échangeur électrique de 18 kW.

Le traitement d'air des magasins

Une seule CTA traite l'air neuf pour les 49 magasins, les ateliers de restauration, les circulations et le réfectoire. Il s'agit d'une CTA à dessiccation dont l'objectif est d'assurer la gestion de l'HR des magasins d'archives tout en maintenant la température dans une fourchette comprise entre 16 °C et 23 °C (Figure 35). Son débit d'air est de 4 117 m³/h et le débit introduit dans chaque magasin est de 60 m³/h, soit un renouvellement d'air d'environ 0,12 vol/h magasin vide.

Ce système à double flux comprend les éléments suivants :

- > pour la partie introduction d'air neuf, on trouve dans le sens du flux d'air :
 - la filtration,
 - la roue humide permettant l'échange d'humidité entre l'air neuf et le rejet d'air,
 - la roue sèche pour la récupération d'énergie (chaleur sensible) entre l'air neuf et le rejet d'air,
 - un laveur d'air à 3 étages pour l'humidification,
 - une batterie de chauffage à eau chaude ;
 - le ventilateur de soufflage à débit variable,
 - les sondes de régulation au soufflage (pression, HR, et température) ;

> pour la partie extraction et rejet d'air, on trouve dans le sens du flux d'air :

- les sondes de régulation à la reprise d'air (pression, HR, et température),
- la filtration,
- un laveur d'air pour le refroidissement adiabatique,
- la roue sèche pour la récupération d'énergie (chaleur sensible) entre le rejet d'air et l'air neuf,

- une batterie chaude pour le chauffage de l'air de régénération du déshydrateur (roue humide),
- la roue humide pour la déshumidification,
- le ventilateur d'extraction à débit variable.

L'automate de cette CTA gère trois stratégies de fonctionnement, suivant les périodes climatiques de l'année.

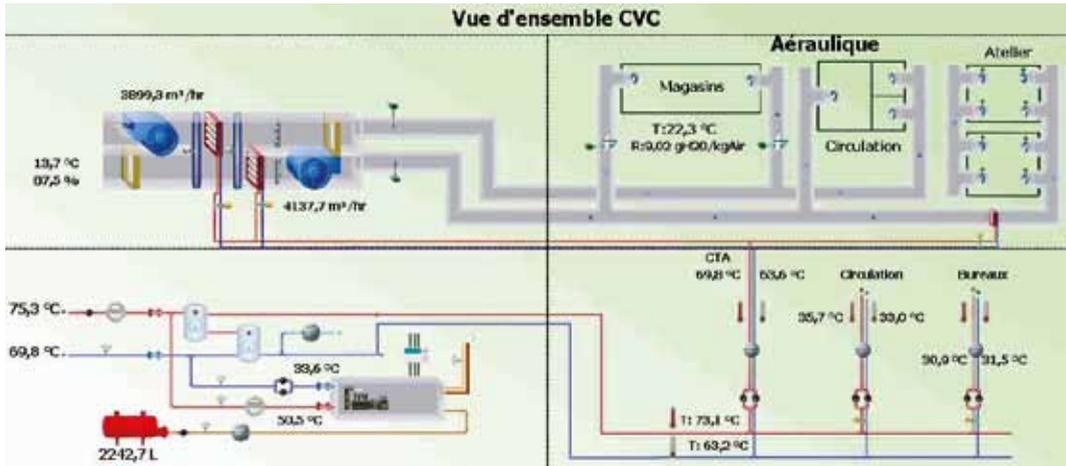


Figure 35. Schéma de principe général du traitement d'air des Archives départementales du Nord



Image 26. Vue de la CTA à dessiccation dans le local technique du sous-sol

Le poids d'eau au soufflage

La CTA fonctionne en « mode tortue » : lorsque le poids d'eau de l'air extérieur est inférieur à $2 \text{ g}_h/\text{kg}_{\text{as}}$ ou supérieur à $10 \text{ g}_h/\text{kg}_{\text{as}}$ (valeurs paramétrables), il n'y a plus d'apport d'air neuf dans les magasins (fermeture des registres) ; la CTA continue néanmoins à assurer un débit minimum pour les espaces de travail.

Le poids d'eau au soufflage est géré par une régulation proportionnelle intégrale, en fonction de la moyenne des HR mesurées dans les magasins :

- > si la moyenne des magasins indique une HR supérieure à 55 %, le déshumidificateur à adsorption assure la déshumidification ;
- > lorsque l'HR < 45 %, les étages du laveur d'air de l'humidificateur sont sollicités ;
- > entre 45 % et 55 %, la machine régule les étages de l'humidificateur en fonction de l'HR moyenne des magasins.

La température de soufflage de l'air neuf introduit dans les magasins suit une pente en fonction de la température moyenne des magasins. En hiver, si cette température est inférieure à $16 \text{ }^\circ\text{C}$, la température de soufflage est au maximum de $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$. En été, si cette température est supérieure à $24 \text{ }^\circ\text{C}$, la température de soufflage est de $16,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

La conception du réseau aéraulique de cette CTA permet d'assurer des fonctions complémentaires telles que :

- > l'isolement de chaque colonne de soufflage et de reprise d'air en cas d'infestation de moisissures dans l'un des magasins, permis par le jeu des registres en entrée et en sortie de chaque pied de colonne ;
- > l'isolement d'un magasin particulier, par le même principe ;

- > la possibilité d'évacuer l'air de la colonne du magasin pollué, par l'adjonction en sous-sol d'un extracteur mobile et d'une gaine flexible. En effet chaque pied de gaine est équipé d'une prise d'air en attente ;
- > la possibilité de réaliser une sur-ventilation du ou des magasins pollués en remplaçant dans la gaine d'entrée d'air traité, le module de réglage (MR) calibré à $60 \text{ m}^3/\text{h}$ par un module calibré à $200 \text{ m}^3/\text{h}$. Dans cette configuration la régulation de pression corrigera automatiquement le débit de la CTA.

Le brassage d'air dans les magasins

Le brassage d'air dans chaque magasin est assuré par des ventilateurs brasseurs d'air. Il y en a trois par magasin d'un débit d'air unitaire de $900 \text{ m}^3/\text{h}$. Pour les magasins situés aux deux extrémités du bâtiment, donnant sur les pignons et ceux du dernier étage implantés sous la terrasse, un des trois brasseurs d'air est équipé d'une résistance électrique chauffante de 2 kW . Elle permet de corriger les écarts de température des magasins exposés à des déperditions plus importantes.



Image 27.

Ventilateur brasseur d'air en plafond des magasins

Pour limiter les consommations d'énergie, un système de délestage a été paramétré dans la GTB. Ces brasseurs d'air fonctionnent suivant trois cycles et, dans tous les cas, deux brasseurs au maximum peuvent fonctionner simultanément. Ainsi, lorsque les brasseurs fonctionnent par groupe de deux avec permutation (cycles 1-2, 2-3 et 1-3), le temps de fonctionnement des cycles est paramétrable ; le cycle actuel fait fonctionner deux brasseurs pendant 15 mn toutes les heures.

En ajoutant celui dû à l'apport d'air neuf, on atteint un débit minimum de 510 m³/h, ce qui représente en réalité un brassage d'environ 1 vol/h. Il est possible d'atteindre un débit de 1 860 m³/h, soit un brassage de 3,6 vol/h maximum, en modifiant le programme de l'automate et en supprimant le délestage. Dans ce cas, deux brasseurs d'air fonctionneraient en permanence par cycle.

Les brasseurs d'air sont placés au plafond et répartis dans chaque magasin. En cas d'ouverture de la porte d'un magasin, ils sont automatiquement mis à l'arrêt.

Diffusion de l'air

L'introduction d'air neuf provenant de la CTA à dessiccation se fait dans l'angle de chaque magasin, au travers d'une simple grille de soufflage. Le débit d'air neuf est maintenu constant (60 m³/h) grâce à un régulateur de débit type module MR. La reprise est implantée dans l'angle opposé du magasin.

Traitement d'air des magasins spéciaux

Les magasins de stockage de documents spéciaux (photographies, films, multimédia, bandes magnétiques...) sont traités par des unités plafonnrières à détente directe associées à des déshumidificateurs à adsorption.

Deux chambres froides et leur sas sont également équipés des mêmes types de machines.

Il faut préciser que, comme pour les Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine, l'absence de renouvellement d'air dans les chambres froides a eu pour conséquence de créer une concentration de gaz polluants générant, dans certains cas, des odeurs.

La création d'un petit apport d'air neuf (entre 5 % et 10 % du volume du local) et la mise en place de filtres à charbon actif spécifiques sont envisagés.



Image 28. Unité à détente directe et déshydrateur dans l'un des magasins à basse température

5.5.5 Les conditions climatiques des magasins

Le point délicat étant le déménagement des archives, celui-ci s'est déroulé en plusieurs phases :

- > afin de compléter l'assèchement naturel du bâtiment, la ventilation des magasins neufs (CTA et brasseurs d'air) a été mise en service dès septembre 2012 ;
- > une réception provisoire a eu lieu fin octobre 2012 ;
- > le 12 décembre 2012, 1 kml d'archives a été extrait du magasin ancien le plus stable vers celui du bâtiment neuf le plus stable ;
- > la suite du déménagement a été reportée, car l'HR des magasins de l'ancien bâtiment était trop élevée et les équipements en place non dimensionnés pour évacuer l'humidité du papier ;
- > après plusieurs mois d'interruption, le déménagement a repris début mars 2013 lorsque le poids d'eau des anciens magasins était le moins élevé et à une période beaucoup plus favorable pour déménager les archives ;
- > au fur et à mesure des déménagements, des déshumidificateurs autonomes en location ont été mis en place dans les magasins afin d'abaisser le niveau de l'hygrométrie ;
- > c'est à partir de 2014 que le climat des magasins s'est rapproché des conditions prévues au programme et que les installations de traitement du bâtiment ont pu assurer en partie leurs fonctions.

Les courbes ci-après (Figures 35 à 38) correspondent aux enregistrements effectués dans 7 magasins des niveaux 3 et 6, pour la période de janvier 2014 jusqu'au 20 août 2015. Il convient de préciser que les capteurs sont placés en partie centrale des magasins.

La température se maintient en fonction des saisons entre 23,5 °C et 16,5 °C pour l'étage 3, et entre 24 °C et 15,5 °C pour l'étage 6 sous terrasse. On constate une amplitude un peu plus importante au niveau 6, ce qui s'explique, puisqu'il se trouve au dernier étage, sous la terrasse végétalisée.

L'HR se maintient en fonction des saisons entre 65 % et 37 % pour l'étage 3, et entre 68 % et 42 % pour l'étage 6 sous terrasse. On constate des amplitudes un peu plus importantes au niveau 6.

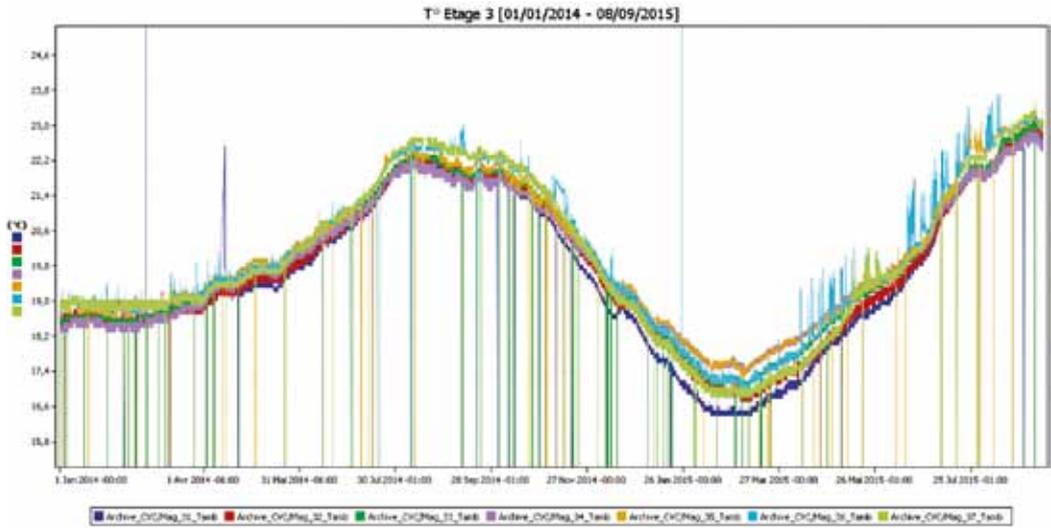


Figure 36. Evolution de la température dans sept magasins du niveau 3 entre janvier 2014 et août 2015

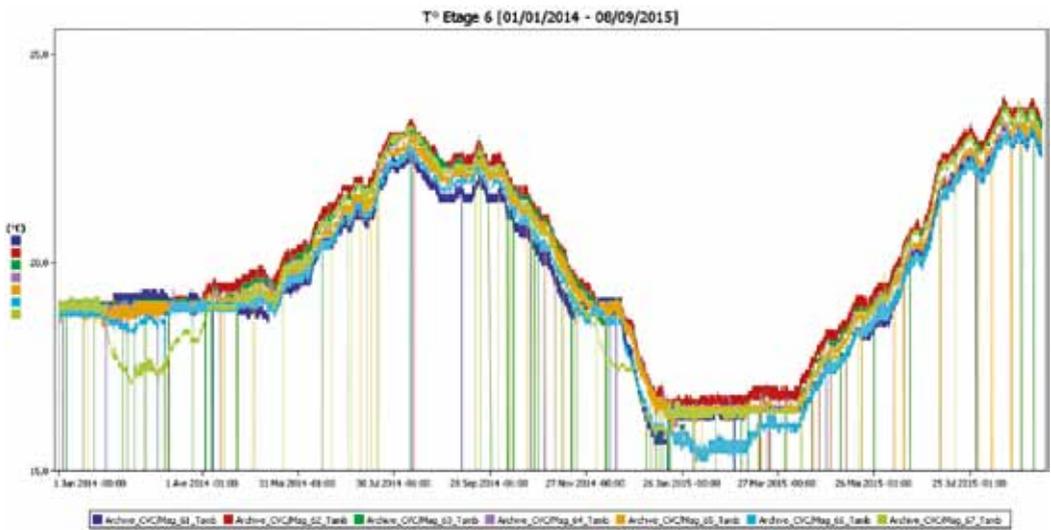


Figure 37. Evolution de la température dans sept magasins du niveau 6 entre janvier 2014 et août 2015

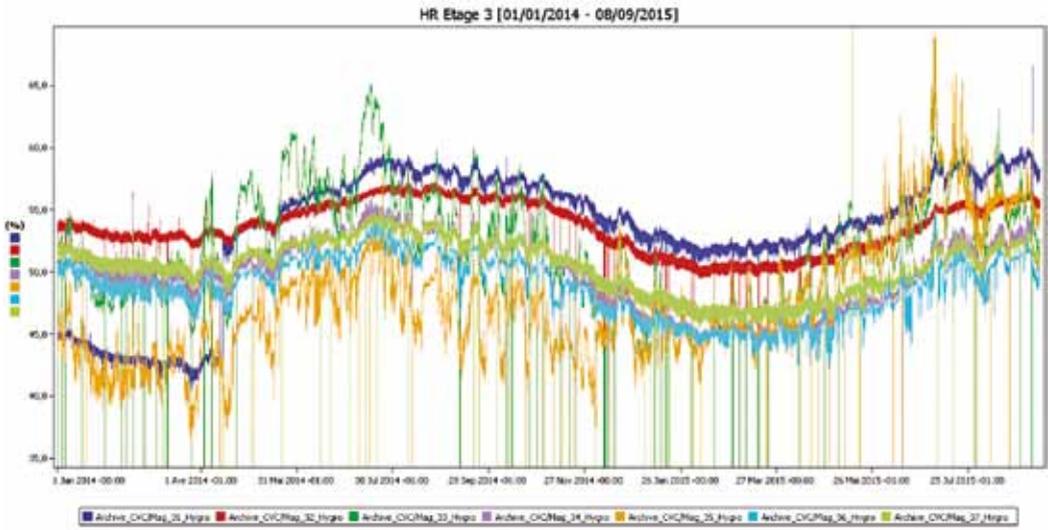


Figure 38. Evolution de l'HR dans sept magasins du niveau 3 entre janvier 2014 et août 2015

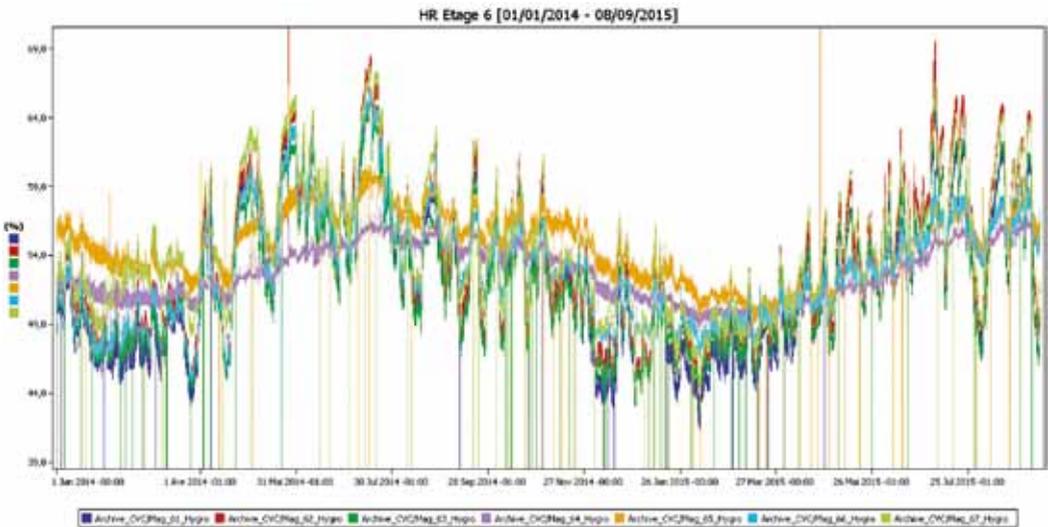


Figure 39. Evolution de l'HR dans sept magasins du niveau 6 entre janvier 2014 et août 2015

5.5.6 Les consommations d'énergie

Chauffage

- > Consommation de la cogénération : 11 000 l d'huile de colza pour l'année 2014. Le pouvoir calorifique de 1 litre d'huile de colza est de 9,53 kWh soit une consommation de 11 000 l x 9,53 kWh = 104 830 kWh.
- > Consommation du chauffage urbain en 2014 : 333 940 kWh.

La consommation totale de chauffage rapportée au m² de surface utile est de :
 $438\,770 \text{ kWh} / 14\,000 \text{ m}^2 = 31 \text{ kWh/m}^2$ de surface utile.

Électricité

La consommation d'électricité rapportée au m² de surface utile est de :
 $426\,622 \text{ kWh} / 14\,000 \text{ m}^2 = 30 \text{ kWh/m}^2$ de surface utile.

La consommation globale (chauffage + électricité) s'élève à 865 392 kWh, soit un ratio de :
 $865\,392 \text{ kWh} / 14\,000 \text{ m}^2 = 62 \text{ kWh/m}^2$.

2014	Electricité kWh	Electricité € TTC	Chauffage MWh	Chauffage R1 € TTC	Chauffage R2 € TTC
	43 503	6 067	56,560	3 281,01	1 207,00
	37 049	6 215	44,550	2 476,47	1 207,56
	37 174	5 696	37,140	1 915,89	1 206,26
	35 072	3 892	26,360	1 328,99	1 208,92
	35 485	4 033	22,360	1 040,92	1 207,49
	31 677	2 780	15,990	718,40	1 207,66
	30 389	3 135	5,840	248,12	1 209,93
	30 565	3 141	3,310	137,92	1 209,06
	34 951	3 515	16,830	744,34	1 209,44
	29 934	3 010	20,000	884,54	1 210,00
	39 823	4 005	32,000	1 415,26	1 210,00
	41 000	4 123	53,000	2 344,03	1 211,00
	426 622	49 612	333,94	16535,89	14504,32

Tableau 4. Consommations de chauffage et d'électricité en 2014

5.5.7 Commentaires

Les conditions de conservation

D'après les valeurs de température et d'HR relevées en partie centrale des 7 magasins des niveaux 3 et 6, on constate :

- > que la température suit bien les objectifs fixés, c'est-à-dire qu'elle se maintient entre 16 °C et 24 °C entre l'hiver et l'été, avec des variations lentes (au mois de juillet 2015, suite à la période estivale plus chaude, on constate que la température moyenne des magasins était supérieure de 1 °C à celle de juillet 2014, avec un maximum de 24 °C au niveau 6) ;
- > que 90 % du temps, l'HR évolue entre 40 % et 60 %, mais que des dépassements sont parfois observés et peuvent atteindre 65 %, voire 68 % au niveau 6, entre mai et juillet 2014 et entre juin et août 2015, confirmant ainsi les limites de la capacité de déshumidification.

Alors que le climat en partie centrale des magasins est stable, on constate des variations importantes et rapides de l'hygrométrie et de la température de l'air soufflé en sortie de la CTA. Ces variations, qui s'expliquent par le très faible débit d'air traité et la puissance limitée de déshumidification, mettent en évidence le rôle de régulateur d'hygrométrie joué par le papier.

Il est très probable que les documents stockés dans la zone proche du soufflage de l'air sont conservés dans des conditions climatiques instables, avec des échanges hydriques plus importants. Cela milite pour qu'il n'y ait pas de documents stockés devant les bouches de soufflage, situation rencontrée très fréquemment dans les services d'archives.

Les consommations d'énergie

Avec une consommation énergétique globale de 62 kWh/m², ce site est sans aucun doute l'un des moins énergivores. Il faut noter que les consommations indiquées pour 2014 englobent à la fois celles du nouveau bâtiment abritant les magasins, et l'ancien bâtiment rénové en 2004. La consommation énergétique globale masque donc les performances réelles du nouveau bâtiment qui ne pourront être appréciées que si un comptage individualisé est mis en place. Précisons qu'il est dommage d'avoir traité l'air neuf des ateliers avec la CTA à dessiccation des magasins d'archives.

La maintenance

La maintenance de ce site est assurée par une société titulaire d'un marché « multi-techniques », qui couvre l'entretien préventif et curatif des installations CVC désenfumage, plomberie, électricité, élévateurs et la partie électromécanique des portes automatiques et des rayonnages mobiles.

Il s'agit d'un contrat de type P2, avec une petite part de P3, pour couvrir les dépenses inférieures à 150 euros (pièces détachées).

Les prestations de la partie CVC comprennent :

- > la présence d'un technicien spécialisé une demi-journée par semaine ;
- > une visite technique annuelle d'un spécialiste du fabricant de la centrale de dessiccation (en sous-traitance) ;
- > une assistance et une maintenance du fabricant de l'appareil de cogénération, également en sous-traitance ;
- > une assistance et une maintenance du système de GTB du site.

La couverture des dépannages est assurée 7 jours sur 7, avec un délai d'intervention de 4 heures.

Le Département du Nord assure :

- > la gestion et le suivi des équipements en génie climatique de ce site, grâce à la présence de spécialistes CVC au sein de la direction opérationnelle des travaux (DOT) ;
- > les petites interventions de gestion courante qui sont effectuées par des techniciens de bâtiment rattachés à la DOT.

Un suivi rigoureux du climat dans les magasins d'archives est assuré par le service de conservation des Archives départementales du Nord qui, à l'aide de l'outil GTB, peut éditer les courbes d'enregistrement provenant des équipements techniques et du climat des magasins.

Chapitre 6

Synthèse comparative des projets

Dans ce chapitre, on se propose de faire une étude comparative des cinq procédés de construction et systèmes de traitement d'air présentés dans cet ouvrage, uniquement ciblée sur la partie des bâtiments abritant les magasins d'archives (bâtiments de conservation).

Cette étude tient compte d'une part, du fonctionnement des équipements, à partir des analyses fonctionnelles et de la bonne marche des installations, tout en restant à l'écoute des utilisateurs (le personnel des archives), des gestionnaires de bâtiment (services techniques des institutions) et des techniciens de maintenance (exploitants), et d'autre part, des enregistrements climatiques des magasins, et/ou des systèmes de traitement d'air, effectués à partir de la GTB du site et/ou des systèmes d'enregistrement climatique autonomes.

6.1 Comparaison des enveloppes des bâtiments abritant les magasins

S'il existe un objectif commun entre ces sites, c'est bien celui de la recherche de la qualité et de la performance des enveloppes des bâtiments de conservation. Pour l'atteindre, les maîtres d'œuvre ont orienté leurs choix en privilégiant :

L'isolation thermique

Le Tableau 5 ci-dessous rappelle la composition des parois extérieures de l'enveloppe des bâtiments abritant les magasins, ce qui permet de comparer les choix constructifs et les niveaux d'isolation des murs extérieurs et des toits terrasses.

En règle générale, on constate une augmentation de l'épaisseur des isolants au fur et à mesure de l'évolution des réglementations thermiques (RT 2000, RT 2005 et actuellement, RT 2012), même si les bâtiments d'archives ne sont pas soumis à ces réglementations.

Les bâtiments sont tous pourvus d'une isolation thermique par l'extérieur, associée à un pare-vapeur. Les châssis vitrés sont implantés dans les couloirs d'accès aux magasins, afin d'y apporter la lumière du jour. En revanche, il n'y en a aucun donnant directement dans les magasins.

L'inertie thermique

Les maçonneries lourdes sont toutes placées côté intérieur des magasins afin d'améliorer l'inertie thermique déjà apportée par la masse des documents. Pour le bâtiment des Yvelines, la recherche d'une optimisation de cette inertie a débouché sur la mise en œuvre d'un mur intérieur en briques creuses de terre cuite, venant en complément des murs porteurs en béton, ces deux murs étant séparés par une lame d'air.

L'étanchéité à l'air

Pour limiter les échanges hydriques entre l'air du magasin et l'air extérieur, il est important de mettre en œuvre un pare-vapeur très efficace. A Lille par exemple, une bâche réfléchissante en aluminium a été mise en place entre la face externe du béton et l'isolant thermique.

L'enveloppe extérieure

Les doubles peaux extérieures jouent également un rôle important sur l'inertie thermique, puisque l'un des objectifs est bien de protéger les maçonneries lourdes, en évitant qu'elles absorbent la chaleur due au rayonnement solaire en été et la rétrocèdent ensuite vers l'intérieur des magasins. Les lames d'air ventilées complètent cette protection, en retardant la transmission thermique.

On trouve des enveloppes détachées du corps du bâtiment par un espace libre aux Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon (environ 0,80 m) et aux Archives départementales du Nord (environ 2,5 m).

Sites et années de réalisation	Maçonnerie	Isolation par l'extérieur et pare-vapeur	Enveloppe extérieure	Toit terrasse ou plafond du dernier niveau
AN de Pierrefitte 2009/2012	Béton de 30 cm.	10 cm de laine de roche avec son pare-vapeur intégré.	Bardage métallique en aluminium.	Plancher béton + 10 cm de polyuréthane + étanchéité + couche de gravillon.
AD des Yvelines 2001/2003	Briques creuses en terre cuite de 20 cm + lame d'air + béton de 20 cm.	Pare-vapeur en feuilles d'aluminium + panneaux de 15 cm de laine de verre.	Lame d'air de 4 cm + dalle de parement de façade en pierre.	Plancher béton + pare-vapeur aluminium + 10 cm de polyuréthane + étanchéité + lame d'air ventilée + dalles sur plots.
AD du Rhône et de la métropole de Lyon 2011/2013	Béton de 20 cm + plénum de 70 cm.	Double peau de 20 cm de laine de roche dans un bardage métallique.	Panneaux emboutis d'alliage cuivre / aluminium	Plafond du dernier niveau de magasins donnant sur des espaces climatisés (bureaux).
AD de la Marne 2011/2013	Béton de 20 cm.	16 cm de laine de roche avec son pare-vapeur.	Bardage en aluminium.	Plancher béton + pare-vapeur aluminium + 10 cm de polyuréthane + complexe d'étanchéité + gravillons.
AD du Nord 2012/2014	Structure en béton de 25 cm + remplissage par des parpaings en béton cellulaire.	Pare-vapeur constitué d'une bâche réfléchissante en aluminium + 22 cm de mousse de polystyrène.	Lame d'air de 10 cm + bardage métallique + un vide accessible de 2,5 m + un habillage extérieur en panneaux d'aluminium ajourés.	Dalle en béton alvéolaire + étanchéité sur un complexe isolant + terrasse végétalisée.

Tableau 5. Composition des parois extérieures de l'enveloppe des bâtiments abritant les magasins

6.2 Conditions climatiques des magasins

Sur les cinq sites étudiés, trois ont pu faire l'objet d'une bonne appréciation des bilans climatiques des magasins.

Deux d'entre eux néanmoins ne disposaient pas d'enregistrements climatiques suffisants pour permettre des analyses comparatives :

- > les Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon, dont les enregistrements de l'été 2015 ont été perturbés par l'absence d'étanchéité des portes d'accès pompiers. Toutefois, les valeurs enregistrées sur les reprises et les soufflages des CTA nous ont permis d'apprécier les tendances de cette installation ;
- > les Archives départementales des Yvelines, dont les derniers enregistrements réalisés avec les nouveaux capteurs n'ont été mis en service qu'en novembre 2015. Par contre, quelques enregistrements datant d'avant 2006 ont permis d'analyser le climat en été.

On peut retenir de l'analyse comparative des conditions climatiques que :

- > lorsque les locaux sont dépourvus de systèmes de diffusion d'air efficaces et lorsque la régulation ne maîtrise pas les conditions climatiques de soufflage, il peut exister une hétérogénéité du climat à proximité des zones de soufflage ;
- > si les capteurs de température et d'HR sont placés en partie centrale des magasins ou au niveau de la reprise d'air générale de plusieurs magasins (ce qui est souvent le cas), ils peuvent rendre compte de conditions climatiques stables, alors que celui de l'air soufflé ne l'est pas ;
- > ce sont en fait les archives se trouvant à proximité de ces zones d'introduction

d'air instable qui, exposées à des variations parfois importantes, vont assurer la régulation de l'hygrométrie à leur détriment, mais au bénéfice des archives placées dans le reste des magasins. Ainsi, si des fluctuations importantes du climat sont constatées dans les zones de soufflage, il est déconseillé d'y placer des documents.

Seule une cartographie climatique permet de contrôler la bonne homogénéité du climat d'un magasin.

6.3 Équipements de traitement d'air

Les cinq sites analysés ont chacun des systèmes de traitement d'air de conception très différente, avec des particularités qui peuvent avoir une incidence directe sur le climat des magasins :

- > les sites des Archives nationales de Pierrefitte et des Archives départementales de la Marne obtiennent de très bons résultats climatiques sur toutes les périodes de l'année. Les installations CVC ont des caractéristiques (débits, puissances) qui permettent de couvrir, tant en hygrométrie qu'en température, des périodes climatiques extrêmes. Les déménagements n'ont posé aucun problème. Quelques réglages et mises au point ont tout de même été nécessaires lors de la mise en service des installations ;
- > pour les Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon, la dérive de température en été et une certaine instabilité de l'HR semblent signifier que les capacités de refroidissement et de déshumidification sont limitées. En effet, la batterie froide ne traite que l'air neuf, soit 10 % du débit d'air total, et son efficacité est bridée par la programmation de l'automate, qui ne la sollicite qu'en ul-

Sites	Température	H.R	Stabilité	Renouvellement d'air	Brassage	Commentaires
AN de Pierrefitte	Maintien de la température entre 16 °C et 24 °C	Evolution sur l'année entre 46 % et 54 %.	Excellente stabilité de la température et surtout de l'HR ; Écarts maxi : 3,5 % par semaine.	Débit : de 5 000 à 9 000 m ³ /h, sauf dépassement des limites de poids d'eau (arrêt); soit 0,10 vol/h.	De 195 000 m ³ /h, soit 2 vol/h, réglé à 1,5 vol/h grâce aux gaines à très haute induction.	A permis de gérer le déménagement, et peut faire face à des dérives de climat (canicule et grands froids).
AD des Yvelines	Maintien de la température entre 16 et 24 °C.	Des valeurs inférieures à 30 % en hiver et supérieures à 60 % en été sont mesurées.	Instabilité de la température lors des démarrages des CTA. Pour l'HR, instabilités très fréquentes.	De 0 à 23 000 m ³ /h, suivant les cycles de fonctionnement, soit entre 0 et 2 vol/h.	De 34 500 m ³ /h, CTA air neuf + brasseurs d'air d'ambiance, soit de 1 à 3 vol/h.	Pas de maîtrise de l'HR. Par contre la température ne semble pas dépasser les 24 °C en été.
AD du Rhône et de la métropole de Lyon	T° stable entre 18 et 25 °C ; légère dérive au-dessus de 25 °C en période estivale, avec une pointe à 26,3 °C en 2015.	L'HR est restée dans les limites admises, avec toutefois des pointes à 60 % en été 2014, et des creux à 32 % en hiver.	L'HR varie jusqu'à 6 à 8 % sur 3 jours.	Entre 0 et 6 900 m ³ /h, soit de 0 à 0,30 vol/h, suivant les modes de fonctionnement.	69 000 m ³ /h, soit 3 vol/h.	Certains réglages, ou paramétrages sont à améliorer. Rafraîchissement /dés humidification limités en cas de période chaude et humide. Humidification lors de périodes sèches.
AD de la Maine	Maintien de la température entre 17 et 19 °C toute l'année.	L'HR varie sur l'année entre 48 % et 54 %.	Bonne stabilité des températures et des hygrométries ; amplitudes de 3 % d'HR à la reprise d'air	Débit total 750 m ³ /h, soit 0,10 vol/h.	Débit unitaire des ACL : 1500 m ³ /h, soit 3 vol/h. Débit total : 24 000 m ³ /h	A permis de gérer parfaitement le déménagement, et peut faire face à des dérives de climat (canicule et grands froids). Il convient de modifier les points de consigne entre 16 ° et 24 °C
AD du Nord	Maintien de la température entre 15,5 et 24 °C toute l'année.	L'HR varie sur l'année entre 42 et 65 % ; pic à 68 %.	On constate certaines instabilités pouvant aller jusqu'à 10 % sur 1 semaine.	Débit : de 0 à 3 000 m ³ /h ; soit de 0 à 0,10 vol/h.	De 510 m ³ /h, avec les brasseurs d'air d'ambiance, soit 1 vol/h. Débit total : 24 000 m ³ /h	Brassage et déshumidification limités. Ne peut faire face à des dérives de climat (froid, ou chaud et humide).

Tableau 6. Caractéristiques climatiques des cinq sites étudiés

time recours, lorsque l'HR moyenne des magasins dépasse la limite tolérée ;

- > les installations des Archives départementales du Nord ont également une capacité de traitement de la déshumidification insuffisante en période estivale. Ceci est essentiellement la conséquence du choix d'un bâtiment à énergie positive. Le recours à des déshumidificateurs autonomes lors des déménagements confirme cette analyse ;
- > aux Archives départementales des Yvelines, le système de traitement d'air a permis de maintenir une température inférieure à 25 °C sans climatisation. En revanche, l'hygrométrie n'est pas satisfaisante, du fait de l'absence des fonctions « humidification et déshumidification ».

La répartition de l'air à l'intérieur des magasins est un paramètre important, qui est également traité de façon différente selon les sites :

- > aux Archives nationales de Pierrefitte, la diffusion et la régulation de l'air soufflé (température et poids d'eau) permettent d'assurer une homogénéité du climat des magasins et il est alors possible de diminuer le débit de brassage d'air grâce aux gaines métalliques à très haute induction en vue de réaliser des économies d'énergie ;
- > le site des Archives départementales de la Marne ne dispose pas d'une régulation limitant les seuils de soufflage, par contre, le réseau aéraulique et les diffuseurs à induction implantés en plafond des magasins permettent de limiter les écarts entre l'ambiance et l'air soufflé ;
- > pour les Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon, c'est le contraire, la régulation contrôle les conditions de soufflage à certaines périodes de

l'année. En revanche, il n'y a pas de diffusion de l'air traité par les CTA puisque celui-ci est introduit en un seul point par transfert de la double peau vers chaque magasin ;

- > les Archives départementales du Nord disposent d'une régulation qui contrôle la température et le poids d'eau au soufflage. En revanche, l'air est introduit dans l'angle de chaque magasin avec un débit très faible, ce qui entraîne à certaines périodes un écart important de température et d'hygrométrie entre l'ambiance et le soufflage ;
- > aux Archives départementales des Yvelines, il n'y a pas de régulation visant à la stabilité du climat au soufflage et l'air est introduit en un seul point des magasins. De plus, le fonctionnement de la ventilation en tout air neuf, suivant les cycles « marche GV / PV / arrêt » ne peut que créer des instabilités de l'hygrométrie.

La conception des régulations et des automatismes est essentielle pour la bonne marche des installations de traitement d'air.

- > Tout d'abord, si l'on veut respecter des gradients de température et d'HR performants, il faut réguler les conditions de soufflage (température et poids d'eau) dans une fourchette étroite, avec un glissement de ces valeurs en fonction des conditions ambiantes des magasins. Cette contrainte implique de maintenir un brassage d'air ou un taux d'air neuf plus important.
- > Le débit d'air de brassage peut être variable dans une certaine limite garantissant une efficacité. On évitera l'arrêt total du brassage.
- > L'introduction de l'air neuf (renouvellement d'air) peut être mise à l'arrêt ou réduite en fonction des seuils limites du

climat extérieur (température et poids d'eau) et de la tendance du climat des magasins. On retrouve ce principe dans quatre des cinq sites étudiés. Cette fonction peut être ajoutée aux Archives départementales de la Marne.

Le traitement de l'hygrométrie

L'analyse du fonctionnement des cinq sites nous permet de confirmer qu'il est nécessaire d'assurer les fonctions d'humidification et surtout de déshumidification, si l'on veut respecter des conditions climatiques préconisées dans le chapitre 1 du présent manuel. Aux Archives départementales des Yvelines, qui en sont dépourvues, l'hygrométrie est instable et dépasse les seuils limites.

Il est utile de noter que les sites étudiés sont implantés dans les parties nord et est de la France, à l'exception de Lyon, exposé à un climat plus continental.

Pour d'autres régions, il faudra des fonctions élargies, à savoir :

- > les sites situés en bordure de mer, qui seront encore plus exposés à un climat humide, nécessiteront une fonction déshumidification renforcée ;
- > pour les bâtiments d'archives situés dans le sud de la France, il faudra obligatoirement assurer les fonctions de refroidissement et de déshumidification, l'humidification pourra être nécessaire en cas d'hiver froid.

L'utilisation de logiciels de simulation thermique dynamique (STD) est aujourd'hui généralisée. Il est fondamental de tenir compte des contraintes d'hygrométrie qui ne sont pas toujours incluses dans ces logiciels.

6.4 Synthèse des consommations d'énergie

L'analyse comparative des consommations d'énergie présentée dans le tableau suivant ne permet pas d'effectuer des comparaisons rigoureuses puisque nous n'avons pas tenu compte des Degrés jours unifiés (DJU) de la période concernée, ni de l'implantation des sites. Il s'agit d'une simple approche des consommations, qui pourrait d'ailleurs être étendue à d'autres bâtiments d'archives, ce qui permettrait de créer une banque de données pour cette famille spécifique de bâtiments.

Dans la dernière colonne du Tableau 7, le ratio de consommation d'énergie primaire a été calculé en kWh/m² SHON RT.an, conformément à la RT 2012.

L'importance du site a évidemment une incidence sur les consommations : plus le nombre de magasins est important, moins il y aura de consommation rapportée au mètre carré.

Pour obtenir les consommations d'énergie primaire électrique, on multiplie l'énergie finale par un coefficient de 2,58 qui tient compte des pertes de production, de transformation, et de transport (réseaux de distribution) :

1 kWh énergie finale = 2,58 kWh énergie primaire/m² SHON RT.an.

Pour rappel, d'ici 2050, les bâtiments tertiaires existants devront atteindre la cible A, soit 50 kWh d'énergie primaire/m² SHON RT.an.

Il n'est malheureusement pas possible d'isoler les consommations d'énergie de la partie magasins, car il n'y a pas de comptage individualisé disponible. Il s'ensuit que les efforts de conception faits par les différentes équipes de maîtrise d'œuvre pour concevoir des bâtiments énergétiquement

performants, ne sont pas faciles à mettre en évidence.

Ainsi :

- > le site des Archives départementales du Nord, qui est le plus performant pour ses magasins, est pénalisé par les consommations du bâtiment existant réhabilité en 2002. Le nouveau bâtiment de conservation devrait avoir un bilan énergétique très faible, même si l'objectif « énergie positive » est très difficile à atteindre sans risquer de dégrader les conditions de conservation. Un comptage individualisé sera bientôt opérationnel pour ce site ;
- > les Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon, ont également une faible consommation d'énergie, qui peut s'expliquer par l'efficacité des thermo-frigo-pompes et de la double peau de l'enveloppe du bâtiment, mais également du fait que les fonctions froid et déshumidification ont une faible puissance ;
- > pour les Archives départementales de la Marne, dont le bâtiment est le plus énergivore, les réglages à 18 °C et 50 % d'HR toute l'année sont en partie responsables de cette surconsommation. Toutefois, le principe de traitement d'air individualisé pour chaque magasin, s'il est plus performant et sécurisant pour les collections, est plus consommateur d'énergie qu'un système centralisé. Avec celui de Pierrefitte-sur-Seine, le bâtiment des Archives départementales de la Marne est le seul pour lequel l'humidité relative reste en permanence dans les fourchettes recommandées ;
- > pour les Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine, il est logique que cette installation surpuissante ait une consommation plus élevée, qui toutefois est restée modérée, du fait d'une gestion optimisée des installations ;

> les Archives départementales des Yvelines ont une consommation importante, alors que l'on n'assure pas, pour les magasins, les fonctions de refroidissement et de traitement de l'hygrométrie. La température reste toutefois en deçà de 25 °C toute l'année, ce qui est à mettre au crédit de sa conception architecturale.

6.5 Maintenance

Parmi ces sites, on peut souligner l'intérêt économique du système mis en place pour le traitement des magasins des Archives départementales du Nord, puisqu'il n'y a qu'une petite CTA pour 49 magasins, ce qui représente une faible charge de maintenance. Toutefois, la complexité du système nécessite de s'entourer de techniciens spécialisés.

Les Archives départementales de la Marne ont une charge de maintenance plus importante du fait de la multiplicité des petits équipements (16 ACL).

Pour les Archives départementales du Rhône et de la métropole de Lyon et les Archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine, la charge de maintenance est importante et le personnel doit également être très performant pour assimiler et gérer le fonctionnement des régulations et des automatismes.

Sites	Consommation de chauffage	Consommation d'électricité	Consommation Cumulée	Ratio cumulé
AN de Pierrefitte S. utile : 62 048 m ² (220 magasins)	Chauffage urbain 2 183 000 kWh, soit 35 kWh / m ² .	4 836 965 kWh, soit 78 kWh/m ² Suivant RT 2012 : 4 836 965 x 2,58 = 12 479 370 kWh soit : 201 kWh/m ² SHON RT.an.	7 019 965 kWh, soit 113 kW/m ²	Suivant RT 2012 : 236 kWh/m ² SHON RT.an.
AD des Yvelines S. utile : 11 836 m ² (23 magasins)	Chaufferie au gaz 840 161 kWh, soit 71 kWh / m ²	674 278 kWh, soit 57 kWh / m ² Suivant RT 2012 : 674 278 x 2,58 = 1 739 637 kWh soit : 147 kWh/m ² SHON RT.an.	1 514 439 kWh, soit 128 kWh / m ²	Suivant RT 2012 : 218 kWh/m ² SHON RT.an.
AD du Rhône et de la métropole de Lyon S. utile : 13 783 m ² (51 magasins)	Thermo-frigo-pompes Electricité CVC : 553 000 kWh, soit 40,1 kWh / m ²	Electricité hors CVC : 555 000 kWh, soit 40,3 kWh / m ²	1 108 000 kWh, soit 80,4 kWh / m ²	Suivant RT 2012 : 1 108 000 x 2,58 = 2 858 640 kWh soit : 207 kWh/m ² SHON RT.an.
AD de la Marne S. utile : 4 049 m ² (16 magasins)	Chaufferie au gaz 537 821 kWh soit 133 kWh / m ²	441 626 kWh, soit 109 kWh / m ² Suivant RT 2012 : 441 626 x 2,58 = 1 139 395 kWh soit : 281 kWh/m ² SHON RT.an.	979 447 kWh, soit 242 kWh / m ²	Suivant RT 2012 : 414 kWh/m ² SHON RT.an.
AD du Nord S. utile : 14 000 m ² (49 magasins)	Chauffage urbain + cogénération 438 770 kWh, soit 31 kWh / m ²	426 622 kWh, soit 30 kWh / m ² Suivant RT 2012 : 426 622 x 2,58 = 1 100 684 kWh soit : 78 kWh/m ² SHON RT.an.	865 392 kWh, soit 61 kWh / m ²	Suivant RT 2012 : 109 kWh/m ² SHON RT.an.

Tableau 6. Caractéristiques climatiques des cinq sites étudiées

Conclusion

Il est essentiel de rappeler que la fonction première d'un bâtiment d'archives est bien de conserver en parfait état et le plus longtemps possible les documents pour les générations futures. La stabilité des conditions de température et d'humidité relative pourra éviter la fragilisation mécanique des documents, l'apparition de moisissures et les transformations physico-chimiques liées à ces variations. Par ailleurs, il a été établi que les documents se conservaient plus longtemps à basse température et à un taux d'humidité relative faible.

Les conditions climatiques optimales pour la conservation des documents ont été assouplies ces dernières décennies en vue de se rapprocher des réglementations issues des politiques de développement durable. Pour les respecter, il faut passer par un ensemble d'actions complémentaires et indissociables, que l'on peut définir suivant cinq axes principaux :

- > tout d'abord, la réalisation d'une construction dotée d'une inertie climatique très performante, ce qui nécessite une hyper-isolation, mais également une parfaite étanchéité à l'air. Ces prestations sont mises en application dans les cinq sites que nous avons étudiés dans le chapitre 9, en suivant des prescriptions souvent supérieures à celles définies dans les nouvelles réglementations thermiques (RT 2012) applicables aux constructions de bâtiments tertiaires. Cette action sur le bâti va tout à fait dans le sens de la stabilité climatique recherchée pour la conservation des documents ;
- > le maintien d'une température entre deux seuils (16 °C et 23 °C) en fonction des saisons, plutôt que 18 °C toute l'année, permet de ne plus mettre en œuvre des climatisations surdimensionnées. Ces températures nécessitent un minimum de chauffage en hiver. En été, l'inertie thermique des nouvelles constructions, associées à des parois extérieures type « double peau » et à une ventilation nocturne, permettent, sur certains sites du nord de la France, d'éviter de recourir à la fonction de refroidissement. Ce constat a poussé un certain nombre de concepteurs à supprimer la climatisation de confort afin de réduire de façon drastique les consommations d'énergie. Mais cela s'est fait parfois au détriment du traitement de l'hygrométrie ;
- > la gestion de l'hygrométrie, indispensable, même pour quelques semaines dans l'année, et qui implique d'assurer des fonctions d'humidification, mais surtout de déshumidification. Dans certains projets récents, cette fonction de déshumidification n'a pas été suffisamment prise en compte, ce qui s'est traduit par des difficultés lors des déménagements ou lors de climats extrêmes (canicule, grands froids, périodes pluvieuses). La déshumidification nécessite une production de froid à basse température, qui évidemment est une source de consommation d'énergie. À ce titre, il est indispensable d'optimiser cette fonction lors de la conception des systèmes de traitement d'air ;

- > la ventilation et le renouvellement d'air associés à une filtration efficace et à une bonne diffusion de l'air jouent un rôle déterminant dans le maintien de la qualité de l'air des magasins d'archives. Leurs niveaux définis dans le chapitre 3 doivent être respectés. Là encore, la consommation électrique des moteurs des ventilateurs alourdit la facture énergétique ;
- > les régulations et les automatismes représentent le cerveau des équipements CVC et vont permettre de gérer et contrôler les conditions climatiques, tout en optimisant les consommations d'énergie. C'est l'analyse fonctionnelle qui définit le fonctionnement des installations de traitement d'air et il convient de la rendre simple et accessible aux différents intervenants. On rencontre souvent des analyses fonctionnelles trop compliquées, qui peuvent occulter des insuffisances dans la conception des installations. Ces équipements doivent assurer l'enregistrement du climat et permettre un suivi rigoureux des conditions climatiques des magasins.

Ces dernières années, les politiques énergétiques ont poussé certains gestionnaires de bâtiments publics à privilégier les économies d'énergie au détriment des contraintes de conservation. Toutefois, il est important de rappeler à nouveau qu'il est essentiel de bien identifier les familles de bâtiments d'archives qui, au même titre que les bibliothèques et les musées, ont des contraintes de conservation, les différenciant ainsi des bâtiments tertiaires traditionnels.

1. Glossaire - Définitions

ACTIVITÉ DE L'EAU (AW) :

$A_w = HRE/100$. Paramètre sans unité, l'activité de l'eau est comprise entre 0 et 1. Plus l'activité de l'eau d'un matériau est élevée, plus l'eau contenue dans ce dernier est disponible pour les micro-organismes. Les bactéries, les levures et les moisissures ne peuvent se développer que sur des matériaux dont l'activité de l'eau est supérieure respectivement à 0,91, 0,88 et 0,80.

BRASSAGE D'AIR :

> **Débit de brassage** : débit d'air soufflé dans un local par unité de temps (air recyclé, air neuf ou mélange des deux, à la différence du débit d'air de renouvellement qui est constitué exclusivement d'air neuf). Il s'exprime en m^3/h .

$$D = \frac{Q_s}{0,34 \cdot \Delta t}$$

D = Débit en m^3/h

Q_s = apports de chaleur sensible

0,34 = chaleur spécifique de l'air sec $W/m^3 \cdot K$

Δt = écart de température entre température du local et température de soufflage K ; ce Δt est généralement compris entre 3 K (système à déplacement d'air) et 12 K (système de diffusion d'air dit par induction, mélange ou dilution).

> **Taux de brassage** : rapport entre le débit d'air soufflé et le volume du local. Avec la diffusion de l'air, il conditionne l'homogénéité de la température et de l'HR dans un magasin. Il s'exprime en h^{-1} mais on a usage soit de l'exprimer en vol/h , soit de ne pas lui attribuer d'unité.

CENTRALE DE TRAITEMENT D'AIR (CTA) :

ensemble d'équipements pouvant assurer les fonctions de filtration, ventilation, renouvellement d'air, rejet d'air, chauffage, refroidissement, humidification, déshumidification. Elle peut fonctionner à débit variable et être dotée d'un caisson de récupération d'énergie. Une CTA peut être monobloc ou assemblée par éléments appelés caissons.

CHALEUR LATENTE :

énergie qu'il faut fournir pour modifier (liquéfier, condenser, vaporiser, solidifier) l'état physique d'un corps.

CHALEUR SENSIBLE :

énergie qu'il faut fournir pour modifier la température d'un corps sans modifier son état physique.

CHANGE-OVER :

terme utilisé pour désigner une batterie réversible pouvant assurer le chauffage en hiver et le refroidissement en été. Une régulation assure automatiquement l'inversion des fonctions chaud et froid, en jouant sur les vannes motorisées des circuits hydrauliques (eau chaude et eau glacée) alimentant la batterie.

CLIMATISATION DE L'AIR :

procédé de traitement de l'air visant à assurer le confort humain des occupants d'un local ou de tout ou partie d'un bâtiment. La climatisation de confort assure la filtration, le chauffage et le refroidissement.

Par extension, dans le domaine patrimonial, on utilise le terme de climatisation pour le traitement global de l'air : chauffage, refroidissement, humidification, déshumidification, purification.

COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE D'UNE PAROI :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}$$

U : Coefficient de transmission thermique d'une paroi en W/m².K

1/h_i : Résistance thermique d'échanges superficiels intérieur en m².K/W

1/h_e : Résistance thermique d'échanges superficiels extérieur en m².K/W

e : Épaisseur de chaque matériau constituant la paroi en m

λ : Conductivité thermique du matériau, en W/m.K

CONDITIONNEMENT DE L'AIR :

procédé de traitement de l'air assurant la gestion du confort, le contrôle de l'hygrométrie et le maintien du niveau de la qualité de l'air d'un local ou d'un bâtiment.

CONDUCTANCE THERMIQUE :

quantité de chaleur transmise par conduction à travers un matériau par unité de temps, unité de surface et pour 1 K d'écart. Elle est exprimée en W/m².K.

DÉBIT D'AIR DE COMPENSATION :

paramètre utilisé lorsque l'on souhaite maintenir la qualité de l'air autour d'un poste de travail générant une pollution spécifique (atelier, laboratoire, etc.), par extraction de l'air pollué via une hotte par exemple. La compensation est le phénomène d'appel d'air qui en résulte. Elle peut être anarchique (introduction d'air par les orifices existants) ou bien contrôlée (installation d'un dispositif mécanique d'entrée d'air compensant les volumes d'air extraits). Le débit d'air de compensation s'exprime en m³/h.

DÉBIT D'EXTRACTION D'AIR :

débit d'air rejeté à l'extérieur du local.

DIFFUSIVITÉ THERMIQUE :

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

λ : conductivité thermique du matériau, en W/m.K

ρ : masse volumique du matériau, en kg/m³

c : capacité thermique massique du matériau en J/kg.K

D : exprimée en m²/s

DOUBLE PEAU :

paroi extérieure qui délimite plusieurs éléments de construction, essentiellement composée de deux niveaux de façade, le niveau extérieur qui a pour fonction de se protéger des contraintes environnementales, et le niveau intérieur, comprenant les structures du bâtiment, qui délimite les espaces intérieurs et assure les fonctions d'inertie et d'isolation thermique. L'espace entre les deux façades constitue une zone climatique intermédiaire qui est en communication avec plusieurs étages.

EFFUSIVITÉ THERMIQUE :

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$$

λ : conductivité thermique du matériau, en W/m.K

ρ : masse volumique du matériau, en kg/m³

c : capacité thermique massique du matériau en J/kg.K

E : exprimée en J/K.m².s

GTB :

gestion technique du bâtiment. Système informatique centralisé permettant de superviser et gérer l'ensemble des équipements qui sont installés dans un bâtiment ou sur un site (CVC, alarmes, contrôles d'accès, ascenseurs, etc.).

GTC :

gestion technique centralisée. Système informatique centralisé permettant de superviser et gérer un lot technique donné : éclairage ou chauffage et climatisation.

HUMIDIFICATION ADIABATIQUE :

c'est un principe d'humidification qui consiste à pulvériser, dans l'air à traiter, de l'eau en très fines gouttelettes sans apport d'énergie. Dans le processus d'évaporation de l'eau, l'air cède sa chaleur, ce qui diminue sa température.

HUMIDITÉ ABSOLUE (HA) :

en météorologie et en physique, on définit l'humidité absolue comme le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans 1 m³ d'air humide, à la pression et à la température considérée. Elle s'exprime en g ou kg de vapeur d'eau par m³ d'air humide.

HUMIDITÉ RELATIVE (HR) DE L'AIR, OU DEGRÉ HYGROMÉTRIQUE :

rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. L'humidité relative est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans les mêmes conditions. Elle s'exprime en pourcentage.

HUMIDITÉ RELATIVE D'ÉQUILIBRE (HRE) :

rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans un matériau sur la pression de vapeur saturante à la même température. L'équilibre hydrique entre l'air ambiant et le matériau est obtenu lorsque l'HRE du matériau est égale à l'HR de l'air ambiant. Elle s'exprime en pourcentage.

HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE (HS) :

masse de vapeur d'eau contenue dans 1 kg d'air humide (masse d'air sec + masse de vapeur d'eau). Elle s'exprime en g ou kg de vapeur d'eau par kg d'air sec. Voir poids d'eau.

HYGROMÈTRE SABRE :

appareil de mesure à l'aide d'une tige plate que l'on glisse au cœur d'une pile de papiers ou de cartons afin d'en mesurer l'humidité d'équilibre.

INERTIE HYDRIQUE :

capacité d'un matériau à stocker et à rejeter de la vapeur d'eau. Cette propriété permet de « tamponner » voire de stabiliser les variations d'humidité relative de l'air ambiant.

INDUCTION DE L'AIR :

procédé permettant, par la vitesse de l'air diffusé, d'obtenir, dès sa sortie, un mélange important entre l'air ambiant et l'air soufflé. Cette technologie permet d'obtenir une meilleure homogénéité de l'air ambiant d'un local.

INERTIE THERMIQUE :

capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer de manière lente.

INSTALLATION CVC :

installation de chauffage, ventilation, climatisation.

ISOLATION THERMIQUE :

ensemble de mesures visant à réduire les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment.

LAME D'AIR :

une lame d'air se caractérise par de l'air contenu entre deux matériaux. Elle va contribuer à améliorer l'isolation d'un mur extérieur. L'air est un excellent isolant particulièrement économique. On trouve des lames d'air non ventilées, appliquées aux doubles vitrages par exemple. En opposition, il existe des lames ventilées, utilisées pour les sous-toitures et les doubles parois.

MODE TORTUE :

lorsque les conditions climatiques extérieures sont très défavorables, les systèmes de traitement d'air peuvent avoir des difficultés à réguler l'air neuf et maintenir la température et l'hygrométrie aux valeurs souhaitées. Si les systèmes de ventilation et de traitement d'air le permettent, il est possible de placer le bâtiment en mode tortue, en arrêtant tout apport d'air neuf. Le brassage est maintenu en recyclant la totalité de l'air, et l'inertie et/ou l'isolation du bâtiment permet une dérive lente de la température.

PHÉNOMÈNE DE POMPAGE :

le phénomène de pompage en génie climatique, correspond à une oscillation rapide et de forte amplitude des conditions thermohygrométriques autour de la valeur cible, généralement due à un défaut de régulation. Celui-ci conduit à une instabilité climatique et une usure prématurée des équipements.

PLÉNUM :

chambre de répartition d'air qui se présente sous la forme d'un caisson implanté sur un réseau aéraulique dans lequel on insuffle de l'air traité sous pression ; cet air est détendu pour être dirigé vers des diffuseurs ou des antennes de soufflage munis de registres de réglages de débit, avant d'être soufflé dans les locaux à traiter.

POIDS D'EAU :

masse de vapeur d'eau contenue dans 1 kg d'air sec. Il s'exprime en g ou kg de vapeur d'eau par kg d'air sec. Le poids d'eau est parfois appelé humidité spécifique.

RENOUVELLEMENT D'AIR :

débit d'air neuf (parfois également appelé débit d'air hygiénique) correspondant à la quantité d'air neuf extérieur introduit à l'intérieur d'un magasin. Il s'exprime en m³ par heure. Le taux de renouvellement est le rapport entre le débit d'air neuf introduit dans le magasin et le volume du local ; il s'exprime en h⁻¹ mais on a usage soit de l'exprimer en vol/h, soit de ne pas lui attribuer d'unité.

SURFACE HORS ŒUVRE NETTE (SHON) :

correspond à la surface hors œuvre nette, après déduction des espaces non chauffés, des sous-sols et combles non utilisés ; un coefficient multiplicateur s'applique pour les espaces à usage autres que l'habitation. Lorsque la SHON rentre dans le cadre de la Réglementation Thermique, elle est appelée SHON RT.

POINTE DE ROSÉE (OU TEMPÉRATURE DE ROSÉE) :

température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser pour former des gouttelettes d'eau.

TENEUR EN EAU :

masse d'eau contenue dans le papier par rapport à sa masse totale. Elle s'exprime en pourcentage.

TEST D'ÉTANCHÉITÉ / TEST D'INFILTROMÉTRIE :

test permettant de vérifier le niveau d'étanchéité à l'air (hors ventilation) d'un bâtiment. On utilise une porte soufflante étanche, équipée de ventilateurs qui mettent en pression le bâtiment. On mesure alors le débit de fuite du bâtiment pour une différence de pression donnée (4 Pa) (intérieure / extérieure) ; ces tests répondent aux prescriptions de la norme NF EN 13829. La RT 2012 impose ce test aux nouveaux bâtiments, lors de la réception de l'ouvrage. Le débit de fuite de l'enveloppe d'un bâti s'exprime en m³/h par m² de parois extérieures.

TRAITEMENT DE L'AIR :

ensemble de mesures visant à modifier les caractéristiques de l'air afin de les rendre conformes aux conditions souhaitées.

UBÂT GLOBAL :

en Watts/m². °C. Coefficient d'isolation thermique global d'un bâtiment, défini dans la RT 2005.

VENTILATION DOUBLE FLUX :

une ventilation double flux consiste à faire circuler dans un échangeur thermique l'air intérieur vicié et l'air neuf issu de l'extérieur. En hiver, l'échangeur thermique récupère la chaleur de l'air vicié pour la transférer à l'air neuf, permettant ainsi le préchauffage de ce dernier. Pour un bâtiment climatisé en été, ce système permet de rafraîchir l'air neuf.

VENTILATION PAR DÉPLACEMENT D'AIR :

système de ventilation de bas en haut, sur toute la section horizontale d'un local ; le soufflage (à basse vitesse) est situé en partie inférieure du local et l'extraction en partie supérieure. Ce principe est adapté aux salles de grandes hauteurs et aux locaux ayant des charges importantes (salle de conférence, auditorium...).

2. Les conditions de déménagement des documents



Développement de l'exemple 3 du paragraphe 1.6.

On se propose de faire une approche de la quantité de vapeur d'eau à éliminer et du temps qu'il faudrait pour ramener un magasin d'archives dans les conditions de l'exemple 1, développé dans le paragraphe 1.1.2.

Le magasin d'archives pris en exemple présente une capacité de 500 m³, dont 90 m³ sont occupés par 80 tonnes de documents.

> Soit des conditions de stockage initiales (documents en transit) :

- $T = 16 \text{ °C}$, $HR = 65 \%$; teneur en eau = 7,5 g de vapeur d'eau (g_{ve}) par kg d'air sec (kg_{as}), soit 8,52 g/m³ (volume massique de l'air = 0,88 m³/kg),
- la contenance en vapeur d'eau de l'air ambiant du magasin est de $410 \text{ m}^3 \times 8,52 \text{ g m}^{-3}$, soit 3,493 kg,
- la teneur en eau du papier est de 8,54 % de la masse des documents, soit pour les 80 tonnes d'archives : $80\,000 \text{ kg} \times 0,0854 = 6\,832 \text{ kg}$ d'eau contenus dans les archives.

> Les conditions à atteindre dans les nouveaux magasins sont celles de l'exemple 1 soit :

- $T = 20 \text{ °C}$; $HR = 50 \%$; teneur en eau = 7,4 g_{ve} par kg_{as} soit 8,31 g/m³ (volume massique de l'air = 0,89 m³/kg),
- la contenance en vapeur d'eau de l'air ambiant du magasin est de $410 \text{ m}^3 \times 8,31 \text{ g m}^{-3} = 3,407 \text{ kg}$,
- la teneur en eau du papier est de 6,3 % de la masse des documents, soit pour les 80 tonnes d'archives : $80\,000 \text{ kg} \times 0,063 = 5\,040 \text{ kg}$ d'eau contenus dans les archives.

> Au total, la quantité d'eau à éliminer est estimée à :

- pour l'air ambiant : $3,493 - 3,407 = 0,086 \text{ kg}$ de vapeur d'eau,
- pour les documents : $6\,832 - 5\,040 = 1\,792 \text{ kg}$ d'eau,
- pour les parois des magasins (murs, planchers, plafonds) : 179 kg.

Soit une quantité totale approchée de 1 971 kg d'eau à déshumidifier.

Pour les murs et les planchers, la quantité d'eau est fonction de la nature des matériaux les constituant ; nous avons adopté arbitrairement la valeur de 10 % de la capacité hydrique des documents, soit 179 kg d'eau.

Sur ce point, dans le manuel de climatologie, Pierre Diaz Pedregal considère que la capacité hydrique des magasins constitués de parois en béton reste très inférieure à celle apportée par les documents papier.

Les raisons suivantes permettent d'étayer ce constat :

- > les surfaces d'échange des documents sont beaucoup plus importantes que celles des parois des magasins ;
- > la capacité d'adsorption du papier est beaucoup plus importante que celle du béton ;
- > les revêtements muraux (peinture anti-poussière par exemple) réduisent les échanges hydriques entre le béton et l'ambiance des magasins.

Le temps nécessaire pour mettre à l'équilibre les documents d'un magasin dépendra de la capacité de déshumidification de l'installation et du taux de renouvellement d'air.

- > Avec un taux de renouvellement d'air de 0,10 vol/h et une puissance de déshumidification moyenne de 5 g/kg d'air, soit $50 \text{ m}^3/\text{h} \times 5 \text{ g/kg} = 250 \text{ g/h}$ de déshumidification.

Il faudra donc 7 884 heures pour évacuer cette eau, c'est-à-dire environ 328 jours.

- > Avec un taux de renouvellement d'air de 0,30 vol/h et une puissance de déshumidification moyenne de 5 g / kg d'air, soit $150 \text{ m}^3/\text{h} \times 5 \text{ g/kg} = 750 \text{ g/h}$ de déshumidification.

Il faudra donc 2 628 heures pour évacuer cette eau, c'est-à-dire environ 109 jours.

Nota : ce calcul reste très empirique, puisque la diffusion de vapeur d'eau à travers les parois n'est pas prise en compte.

Crédits

Photographies de couverture :

Archives nationales © SIAF - France Saïe-Belaïsch

Archives départementales des Landes © James Camus

Archives départementales de Meurthe-et-Moselle ©

SIAF - France Saïe-Belaïsch

Archives départementales de l'Aube © Conseil départemental de l'Aube. Noël Mazières

Figure 1 © Pierre Diaz Pedregal - In Extenso

Figure 2 © Pierre Diaz Pedregal - In Extenso

Figure 3 © site internet Infoclimat :

<http://www.infoclimat.fr>

Figure 4 © Thi-Phuong Nguyen d'après documentation Puls'air.

Image 1 © Alain Soret

Image 2 © SIAF - France Saïe-Belaïsch

Image 3 © AD de la Haute-Corse

Image 4 © SIAF - France Saïe-Belaïsch

Image 5 © SIAF - France Saïe-Belaïsch

Image 6 © AD de l'Ardèche

Image 7 © SIAF - France Saïe-Belaïsch

Image 8 © AN - Serge Reby

Image 9 © AD de l'Ardèche

Figure 5 © Thi-Phuong Nguyen

Image 10 © AD des Yvelines

Image 11 © SIAF - France Saïe-Belaïsch

Image 12 © SIAF - France Saïe-Belaïsch

Figure 6 © Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, Ministère du Logement et de l'Habitat Durable

Figure 7 © Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, Ministère du Logement et de l'Habitat Durable

Figure 8 © Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, Ministère du Logement et de l'Habitat Durable

Figure 9 © Thi-Phuong Nguyen

Figure 10 © Thi-Phuong Nguyen

Tableau 1 d'après documentation Xpair (www.formation.xpair.com/essentiel-genie-climatique/lire/differents-types-pompes-chaleur.html)

Image 13 © Archives nationales

Image 14 © IGN 2016

Figure 11 © Archives nationales

Figure 12 © Archives nationales

Figure 13 © Archives nationales

Image 15 © Alain Soret

Figure 14 © Archives nationales

Figure 15 © Archives nationales

Figure 16 © Archives nationales

Figure 17 © Archives nationales

Figure 18 © Archives nationales

Image 16 © Paul Maurer

Figure 19 © AD Yvelines

Figure 20 © AD Yvelines

Image 17 © Alain Soret

Image 18 © Alain Soret

Figure 21 © AD Yvelines

Figure 22 © AD Yvelines

Figure 23 © AD Yvelines

Image 19 © Département du Rhône - Patrick Ageneau

Image 20 © Alain Soret

Image 21 © Alain Soret

Figure 24 © AD du Rhône et de la métropole de Lyon

Figure 25 © AD du Rhône et de la métropole de Lyon

Figure 26 © AD du Rhône et de la métropole de Lyon

Figure 27 © AD du Rhône et de la métropole de Lyon

Figure 28 © AD du Rhône et de la métropole de Lyon

Figure 29 © AD du Rhône et de la métropole de Lyon

Figure 30 © AD du Rhône et de la métropole de Lyon

Figure 31 © AD du Rhône et de la métropole de Lyon

Image 22 © Fred Laures, Reims

Figure 32 © AD de la Marne

Figure 33 © AD de la Marne

Figure 34 © AD de la Marne

Image 23 © Photo. Jean-luc Thieffry

Image 24 © Alain Soret

Image 25 © Alain Soret

Figure 35 © AD du Nord

Image 26 © Alain Soret

Image 27 © Alain Soret

Image 28 © Alain Soret

Figure 36 © AD du Nord

Figure 37 © AD du Nord

Figure 38 © AD du Nord

Figure 39 © AD du Nord

Auteurs et contributeurs

Auteur

Alain Soret – Ingénieur climaticien – société SORCLIM

Contributeurs

Ministère de la Culture et de la Communication

Direction générale des Patrimoines

Service interministériel des Archives de France

Claire Sibille de Grimouärd, Stéphanie Roussel, Thi-Phuong Nguyen, Marie-Dominique Parchas, France Saïe-Belaïsch, Hélène Zettel.

Archives nationales

Bruno Bonandrini

Centre de recherche et de restauration des Musées de France

François Boyer, Isabelle Colson

Service du livre et de la lecture, Département des bibliothèques

Noëlle Balley, Marc Germain

Remerciements

Le Service interministériel des Archives de France tient à remercier chaleureusement Alain Soret et l'ensemble des auteurs et contributeurs de ce manuel de climatologie, aboutissement d'un travail de plus de cinq années. Ces remerciements s'adressent également aux directeurs et directrices des Archives nationales et des Archives départementales dont les bâtiments sont présentés ici, ainsi qu'à leurs équipes : la qualité de nos échanges et leur disponibilité nous ont permis d'enrichir notre savoir et nos réflexions.

Par leurs connaissances et leur implication sur le terrain, ainsi que par leur relecture, les inspecteurs du collège archives de l'Inspection générale des patrimoines ont également apporté une aide précieuse à l'élaboration de ce manuel : qu'ils en soient ici vivement remerciés.

Nos remerciements vont enfin aux services qui nous ont transmis des documents photographiques.

Publication réalisée par le Ministère de la Culture et de la Communication,

Direction Générale des Patrimoines, Service Interministériel des Archives de France

Directeur de la publication Hervé Lemoine, directeur, chargé des Archives de France

Coordination de la rédaction et coordination éditoriale Claire Sibille de Grimouärd, Stéphanie

Roussel, Thi-Phuong Nguyen, Marie-Dominique Parchas, France Saïe-Belaïsch, Hélène Zettel,

Service interministériel des Archives de France.

Conception graphique Atelier Mardisoir !

Impression Corlet imprimeur

Mai 2017 - ISBN : 978-2-911601-67-5

Archives



Ministère
Culture
Communication