



Document original

ARCHIVES MUNICIPALES

*Etude de climat
et de biocontamination
des magasins d'archives*

Boulogne sur mer

RAPPORT FINAL

Sommaire

INTRODUCTION

I- CARACTERISTIQUES DU BATIMENT ET DE SON AMENAGEMENT.

I- 1 TYPE DE RANGEMENT

I-2 EQUIPEMENTS TECHNIQUES

I-3 SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BATIMENT

I-4 ETAT SANITAIRE

I-4-1 Isolation thermique

I-4-2 Humidité

II ETUDE DU CLIMAT GENERALITES

II-1 APERÇU HISTORIQUE DES EVENEMENTS

II-2 METHODOLOGIE

II-3 REMARQUES PREALABLES.

II-3-1 Positionnement des enregistreurs d'humidité et de température.

II-3-2 Paramètres de référence.

II-3-3 Valeurs statistiques.

II-4 ANALYSE DES ENREGISTREMENTS DU 1 AOUT AU 2 DECEMBRE 2011.

II-4-1 Analyse des données du climat extérieur.

II-4-2 Analyse des données HR et T des salles étudiées.

III ETUDE DU CLIMAT SALLE PAR SALLE.

III-1 SALLE 6.

III-1-1 Caractéristiques climatiques.

III-1-2 Comportement du climat vis-à-vis des facteurs externes.

III-2 SALLE 5.

III-2-1 Caractéristiques climatiques.

III-2-2 Comportement du climat vis-à-vis des facteurs externes.

III-3 SALLE 9

III-3-1 Caractéristiques climatiques.

III-3-2 Comportement du climat vis-à-vis des facteurs externes.

III-4 COMPORTEMENT CLIMATIQUE DES MAGASINS PAR RAPPORT AUX CONDITIONS EXTERNES

IV ANALYSE DES DONNEES DES ENREGISTREURS PLACES DANS LES BOITES D'ARCHIVES

IV-1 CAMPAGNES DE MESURES DU 01/08/2011 ET DU 02/12/2011.

IV-1-1 Interprétation des résultats.

IV-2 SUIVIS DE L'HUMIDITE ABSOLUE A L'INTERIEUR ET A L'EXTERIEUR DES BOITES 175BA119 (SALLE 5) ET 35W1753 (SALLE 9) PENDANT 4 MOIS.

IV-2-1 Interprétation des résultats

V- ETUDE DE LA BIOCONTAMINATION.

V-1 ETAT DES LIEUX

V-2 ECHANTILLONNAGE

V-2-2 Prélèvements : localisation

V-2-3 Résultats

V-3 INTERPRETATION ET PRECONISATIONS

V-3-1 Degré général de biocontamination

V-3-2 Identification et impact des espèces fongiques majoritaires isolées.

VI CONCLUSION

VII PRECONISATIONS ET RECOMMANDATIONS

VI-I au niveau du bâti.

VI-2 au niveau des équipements.

VII-3 au niveau de l'assainissement microbiologique

Introduction.

A la suite d'une demande de devis par Madame Berthaud nous avons organisé un déplacement aux Archives municipales de Boulogne sur mer le 1^{er} juin 2011. Madame Berthaud nous a guidé durant une visite du bâtiment des archives afin d'évaluer les conditions de conservation et l'étendue de la bio-contamination des magasins contaminés.

Suite à cette visite nous avons estimé que la situation est instable et que les problèmes responsables de cette contamination doivent être identifiés. Pour comprendre les phénomènes qui sont à l'origine de cette bio-contamination, il est nécessaire de faire un diagnostic en partant d'une étude du climat et d'une étude de bio-contamination. Elles permettront d'identifier les raisons du développement des souches et de déterminer leur activité et leur concentration.

I- Caractéristiques du bâtiment et de son aménagement.

Les archives municipales sont abritées dans bâtiment du XIX siècle. Il a été transformé pour créer : un espace d'accueil, un espace sanitaire, une salle de lecture, des bureaux et des magasins d'archives. Les magasins sont répartis sur 2 niveaux- 7 magasins au rez de chaussée et 2 magasins au 1^{er} étage. Les surfaces varient de 11 à 190 m².

I-1 TYPE DE RANGEMENT

Certains magasins du rez de chaussée sont équipés d'étagères mobiles (type compactus) et d'étagères fixes. Au second étage les magasins sont aménagés essentiellement avec des étagères fixes.

I-2 EQUIPEMENTS TECHNIQUES

Pour réguler le climat, les archives sont équipées d'une VMC double flux (ventilation mécanique contrôlée) installée depuis 2010. La prise d'air et le rejet de l'air se font à l'extérieur, rue Berthinghen. Un filtre est placé dans le plénium, fig. 1,2.



Fig : 1, 2 : Prise d'air et filtre

Le climat de l'ensemble du bâtiment est impacté par un système de ventilation sans traitement de l'air soufflé, hormis la filtration.

L'air frais est distribué dans chaque magasin par une gaine de ventilation et l'air vicié est récupéré dans une autre gaine pour être rejeté en extérieur, fig.3.



Fig.3 : Gaine de renouvellement et d'évacuation de l'air.

Les débits d'air soufflés et repris sont variables :

- 100 m³/h pour le garage, le coffre, les salles 2, 6 et 9 ;
- 200 m³/h pour la salle 5.
- 100 m³/h et 200 m³/h pour les salles 1 et 8.

Les débits d'air notés (théoriques et non vérifiés) sont réglés par le diamètre des conduits de ventilation. Les conduits d'arrivée et de reprise d'air sont indépendants. Toutes les salles sont équipées de deux bouches de soufflage et de deux bouches de reprise d'air à l'exception du garage et du coffre (1 / 1) et de la salle 8 (6 / 6).

Il est également à noter que le garage est soumis à des entrées d'air de l'extérieur dues à la proximité de l'aire de déchargement.

Dans chaque magasin l'humidité et la température sont indiquées par un thermo hygromètre de marque JRI. Les données ne sont pas enregistrées et nous n'avons pas d'historique du climat

I-3 SITUATION GEOGRAPHIE DU BATIMENT.

Boulogne-sur-Mer est située dans le département du Pas-de-Calais et la région du Nord-Pas-de-Calais. C'est une ville côtière située au bord de la Manche, marquée par un climat océanique. Les précipitations sont abondantes avec 44,3 mm de précipitations moyennes mensuelles. Les hivers sont relativement doux, avec des gelées et des périodes d'enneigement,

Les vents dominants viennent du sud-ouest ou de l'ouest (façade maritime), mais il existe également des vents froids en provenance du nord.

Situé près de la gare, le bâtiment des archives se trouve en zone urbaine, fig. 4.



Fig.4 : Plan de la ville de Boulogne sur mer

I-4 ETAT SANITAIRE

1-4-1 isolation thermique

Au niveau du local appelé garage, on enregistre en thermographie des différences de températures allant de 17 à 26°C dues à un manque d'isolation thermique, fig. 5.

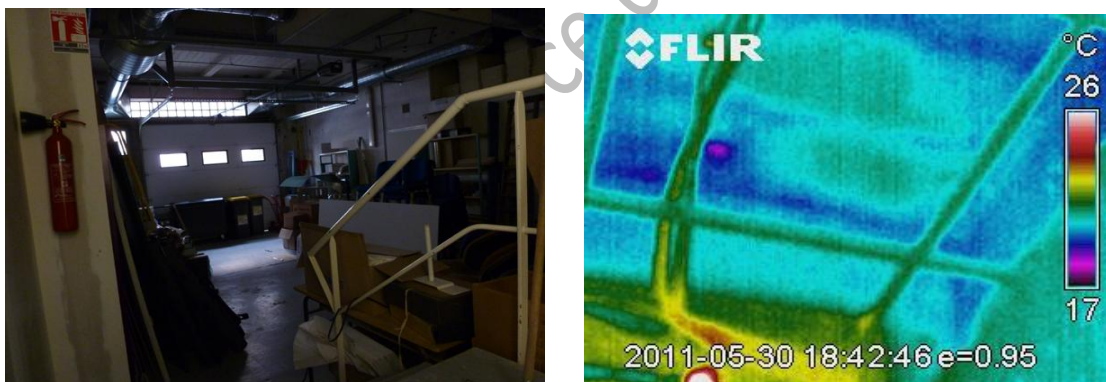


Fig. 5 : Garage, thermogramme.

Dans le réseau de gaines on a également des pertes de charge thermique qui se manifestent très bien en thermographie, fig.6.

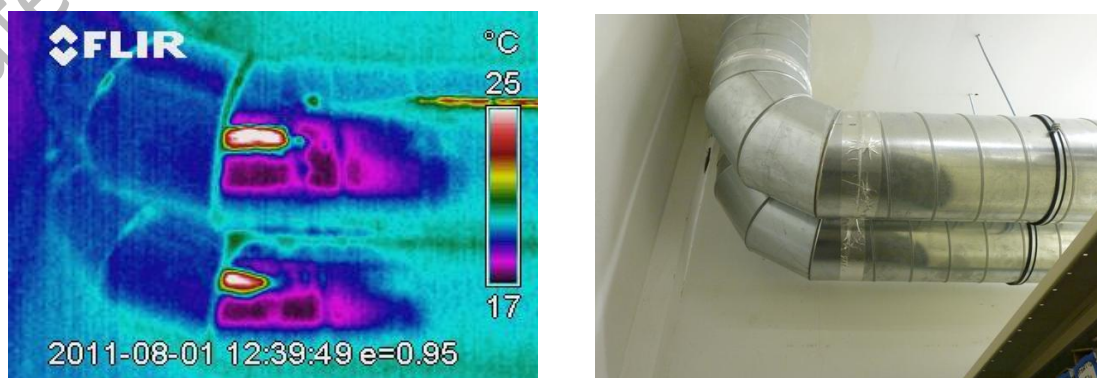


Fig. 6: Variation de température de la gaine.

1-4-2 Humidité.

Au niveau des gaines de conduite d'air nous avons des traces d'humidité, fig. 7



Fig., 7 : Traces d'humidité.

On nous a fait remarqué que dans les salles 1, 5 et 6, le mur du fond (situé face à la porte d'entrée salle 5) se trouve imprégné d'eau. Il est adossé probablement à un remblai extérieur. Ce mur a été recouvert il y a 5 ans d'un enduit d'imperméabilisation. Malgré tout, ce mur présente par endroit des taches brunes, fig.8. Des mesures de teneur en eau dans le mur ont été faites avec un testeur TESTO 606 pour évaluer la teneur en eau dans ce mur, fig.9.



Fig. 8 : taches brunes



Fig. 9 TESTO 606

Résultats

- La première campagne de mesures a été faite en été (01/08/2011). Pendant cette saison le mur du fond, commun aux salles 5 et 6, présente sur plus de 50% une teneur en eau à saturation ($\geq 100\%$). L'eau imprègne donc le mur irrégulièrement. Du point de vue de sa répartition, la saturation en eau se situe dans la salle 6 dans la partie supérieure gauche. Dans la salle 5 elle est présente à la fois sur toute la hauteur du mur à gauche et sur toute la longueur du mur en dessous de 0,5 m. On passe sans transition apparente des zones humides aux zones sèches (0,4 à 1,6 %). La cloison perpendiculaire au mur n'est pas atteinte par l'humidité du mur. Le même mur qui s'élève dans la salle 9 n'est pas atteint par les remontées capillaires de l'eau.
- La seconde campagne de mesure a été faite à la fin de l'automne (02/12/2011). Pendant cette saison le mur du fond commun aux salles 5 et 6 présente une surface imprégnée d'eau quasiment aussi importante qu'en été. Malgré une saison plus humide, les quantités d'eau dans le mur n'ont pas changé, mais la répartition des zones humides a été modifiée. La cloison perpendiculaire est saturée d'eau à sa base.

Apparemment la couche d'isolation qui a été appliquée sur ce mur ne joue pas correctement son rôle. Le mur reste imbibé d'eau qui progressivement va traverser la couche d'isolation sous forme de vapeur. Les résultats de l'inspection du mur sont regroupés sur les deux dessins, fig. 10.

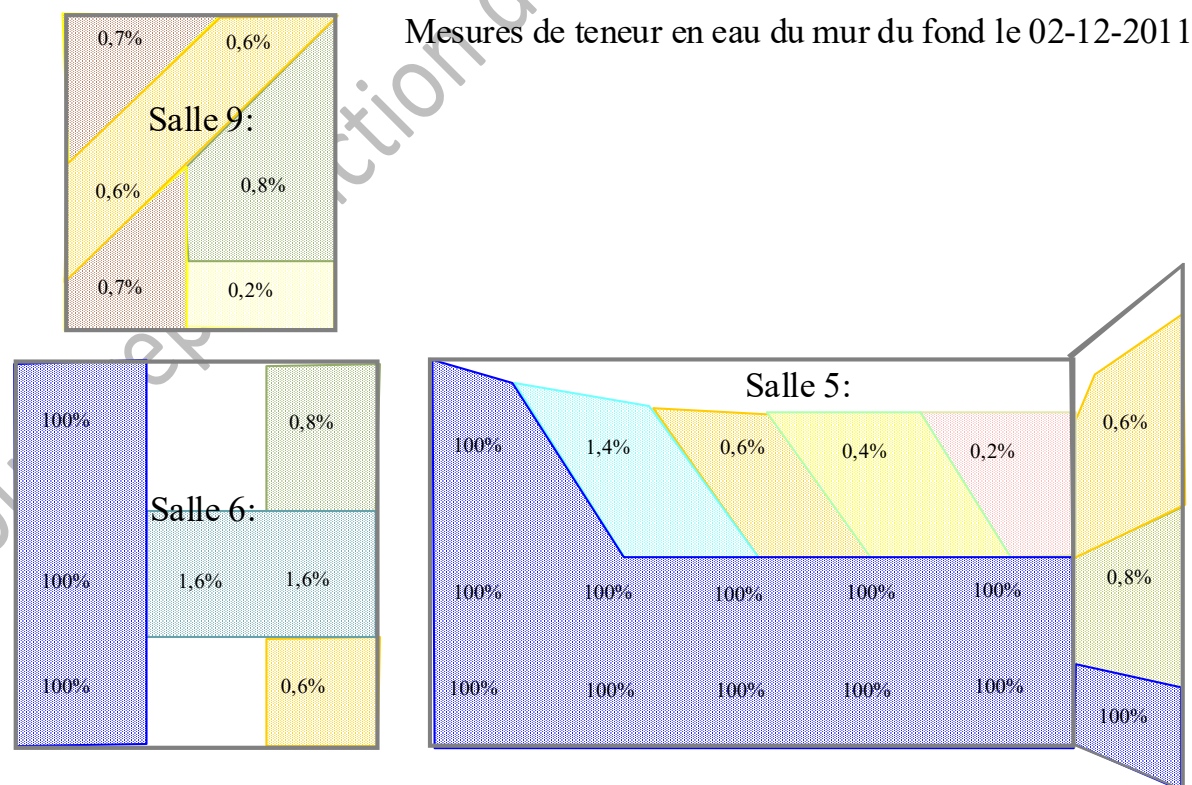
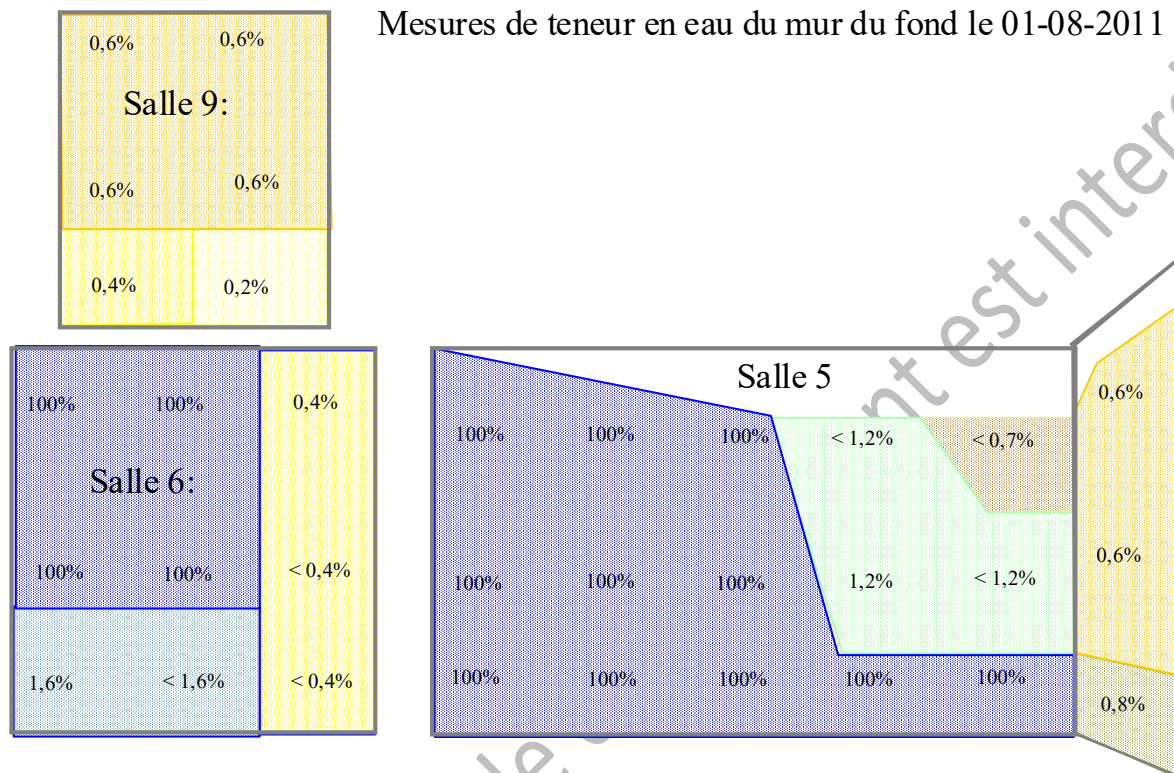


Fig. 10 : Cartographie des % d'eau dans le mur du fond salle, 5, 6, 9.

II- Etude du climat généralités

II-1 APERÇU HISTORIQUE DES EVENEMENTS

La présence de micro-organismes sur les documents a été remarquée et signalée depuis plusieurs années. C'est à la suite d'une demande d'amélioration des conditions de conservation que la VMC a été installée en 2010. Néanmoins malgré la VMC des micro-organismes ont continué à se développer. A la suite d'une nouvelle alerte les Archives de Boulogne sur mer ont contacté les Archives Nationale pour du conseil. L'historique du climat des magasins n'existe pas car il n'y a pas de système d'enregistrements des données climatiques.

II-2 METHODOLOGIE.

Pour une bonne représentativité du climat, la durée des enregistrements de l'humidité et de la température a été fixée à 4 mois, à cheval sur deux saisons. L'étude climatique des magasins d'archives a commencé le 1 août 2011 jusqu'au 2 décembre de la même année.

Trois magasins sur l'ensemble des magasins des archives ont été retenus pour effectuer un contrôle des variations d'humidité et de température au niveau des bouches de soufflage d'air neuf et de reprise d'air vicié. Le choix des salles doit être suffisamment significatif pour pouvoir généraliser le comportement hydrique et thermique des magasins.

Afin d'établir une relation entre le climat externe et interne, un enregistreur TESTO 175 H1 a été positionné à l'extérieur proche de prises d'air extérieur.

Conjointement deux mini-enregistreurs ont été glissés dans deux boîtes d'archives pendant la campagne de mesure pour établir une relation entre le climat des salles et le climat à l'intérieur des boîtes.

Des mesures ponctuelles ont été faites le 1 août et le 2 décembre 2011 :

- à l'intérieur des boîtes d'archives pour mesurer simultanément avec une sonde TESTO SENSOR la teneur en eau des documents et à l'extérieur pour mesurer l'humidité absolue de la salle.
- sur le mur du fond afin de mesurer à l'aide du testeur TESTO 606 la concentration en eau dans le mur concerné et établir une cartographie de la répartition de l'humidité.
- pour recherche de ponts thermiques à l'aide d'une ThermoCAM B2 de FLIRSYSTEMS dans les zones critiques.

II-3 REMARQUES PREALABLES.

Il est important, pour bien comprendre ce qui suit, de rappeler quelques notions liées au traitement de l'air.

L'humidité relative (HR) exprime le rapport entre la quantité d'humidité absolue (HA) présente dans l'air (appelée humidité spécifique) et la quantité maximale que l'air peut contenir. Or, cette quantité maximale augmente avec la température.

En conséquence, à quantité d'eau constante dans l'air, la modification de la température modifie également l'humidité relative. Plus précisément, chauffer l'air permet de diminuer l'humidité relative et refroidir l'air permet d'augmenter l'humidité relative (toujours à humidité spécifique constante).

L'autre paramètre qui peut être modifié pour agir sur l'humidité relative est bien entendu la quantité d'eau dans l'air (l'humidité spécifique).

Pour diminuer la quantité d'eau présente dans l'air, il faut refroidir cet air jusqu'à sa température de rosée. A cette température, l'eau présente dans l'air se condense (c'est-à-dire passe de l'état de vapeur à l'état liquide) et est ainsi extraite du flux d'air. La température de rosée dépend de la quantité d'eau contenue dans l'air.

Les considérations générales faites précédemment nous ont conduits à examiner le comportement climatique de certains magasins et salles sur une période de 4 mois. En prenant en compte ; les mesures d'humidité et de température, les paramètres de référence qui seront définis dans le § II-3-2, les caractéristiques du bâtiment et le climat extérieur, l'analyse du climat nous permettra d'émettre certaines hypothèses sur les relations qui s'établissent entre le bâtiment, le système de traitement de l'air et la bio-contamination. Nos conclusions nous permettront d'affiner le diagnostic.

II-3-1 Positionnement des enregistreurs d'humidité et de température.

Pour rendre compte du comportement hydrique du flux d'air, la salle 5 est équipée de deux enregistreurs thermo hygrométriques, l'un au niveau de la bouche de soufflage d'air neuf, l'autre au niveau de la bouche d'aspiration d'air vicié. Le même dispositif avait été prévu pour la salle 9 mais l'un des enregistreurs a été perdu.

Dans la salle 5 un enregistreur a été placé proche du mur humide.

L'ensemble forme un réseau de 5 enregistreurs autonomes de type TESTO 175 H1 dotés d'un capteur de température sèche et d'un capteur capacitif pour l'humidité relative (réf. annexe). L'ensemble des enregistreurs et leur localisation est regroupé tableau 1.

Tableau 1

E1	extérieur	h = 3,20m près de la prise d'air externe
E2	Salle 5 (rdc)	h =1,3 proche du mur humide
E3 (air nouveau)	Salle 6 (rdc)	h =2,3 m, fixé sur bouche de soufflage,
E4 (air vicié)	Salle 6(rdc)	h =2,3 m,fixé sur bouche d'aspiration
E7 (air nouveau)	Salle 9 (1 ^{er} étage)	h =2,3 m, fixé sur bouche de soufflage,
E8 (air vicié)	Salle 9 (1 ^{er} étage) capt. perdu	h =2,3 m, fixé sur bouche de soufflage,

L'homogénéité de mesures des enregistreurs a été vérifiée en usine. Les écarts constatés sont inférieurs aux tolérances du fabricant et aucune correction n'a besoin d'être effectuée sur les

mesures brutes. Les enregistreurs TESTO 175 H1 ont été mis en place le 2 août 2011 et programmés pour un départ à 17 h de ce même jour. La cadence des mesures est de 2 heures ce qui fait 3700 mesures d'humidité et de température par enregistreur pour une durée 4 mois. La campagne de mesures s'achève le 2 décembre 2011 à 15 h. Ils sont positionnés dans les magasins selon les schémas suivants, fig. 11.

LOCALISATION DES ENREGISTREURS

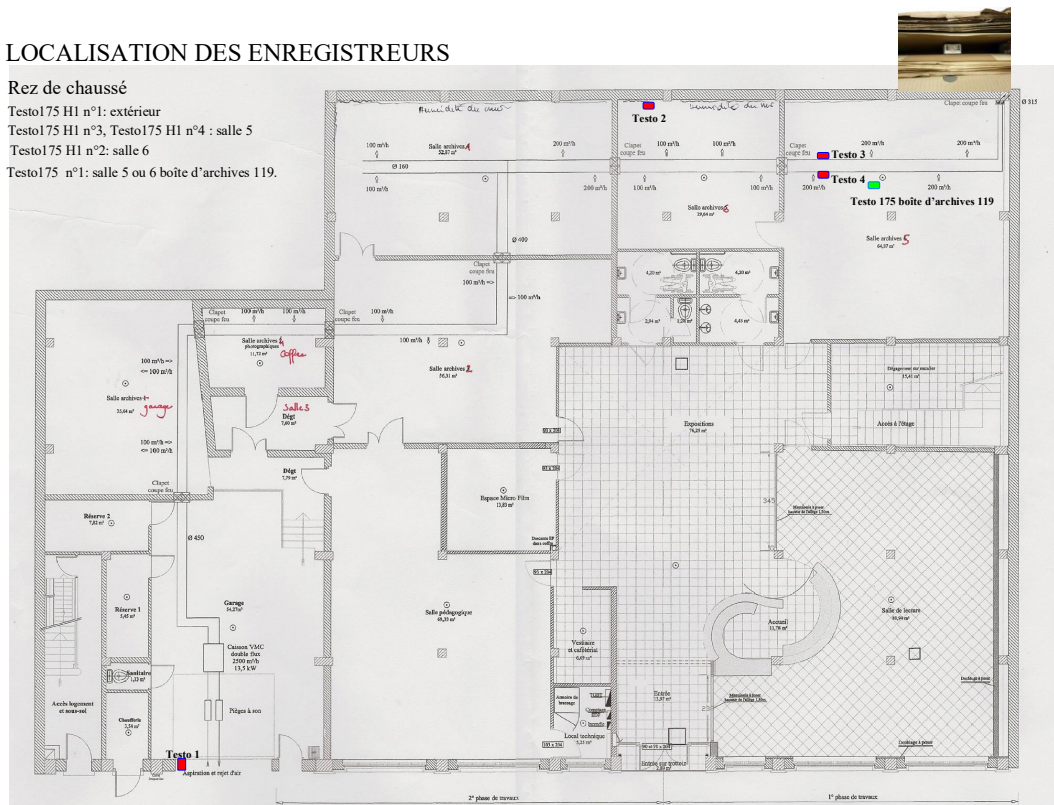
Rez de chaussée

Testo175 H1 n°1: extérieur

Testo175 H1 n°3, Testo175 H1 n°4 : salle 5

Testo175 H1 n°2: salle 6

Testo175 n°1: salle 5 ou 6 boîte d'archives 119.



LOCALISATION DES ENREGISTREURS

Premier étage

Testo175 H1 n°3, Testo175 H1 n°7 et 8 salle 9

Testo175 n°2: salle 9, boîte d'archives 35 W 1753

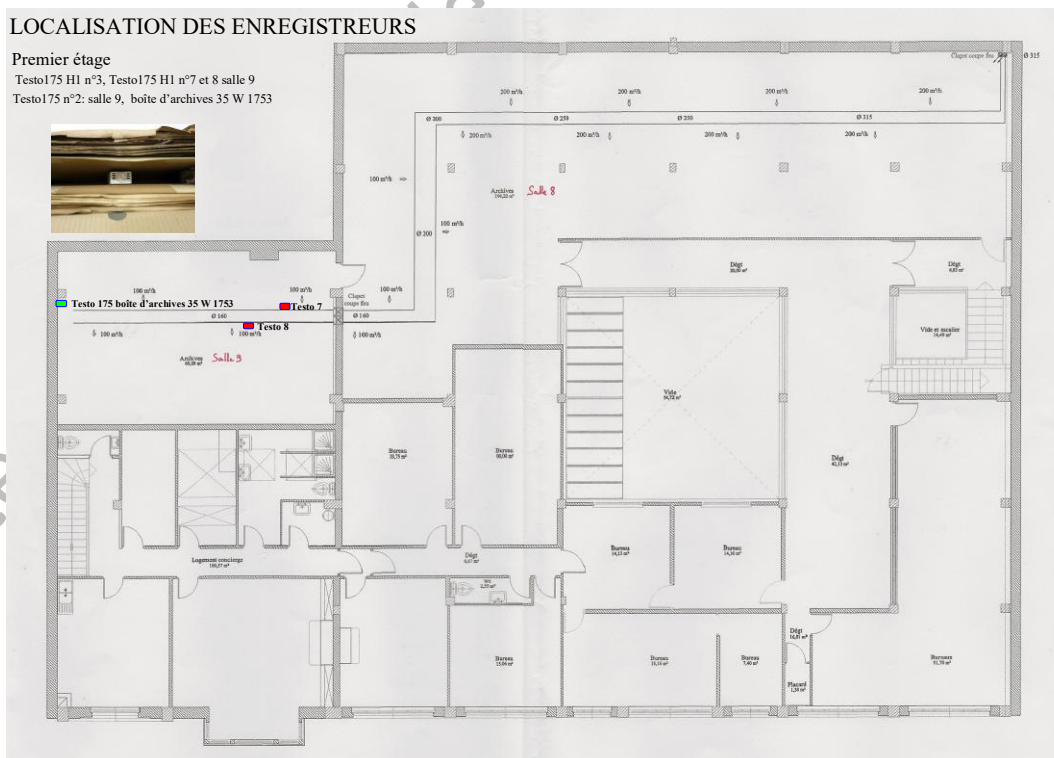


Fig.11 : Localisation des enregistreurs sur le plan des archives.

II-3-2 Paramètres de référence.

La conservation des archives impose des conditions climatiques rigoureuses. Certains matériaux conservés nécessitent des conditions différentes et se trouvent isolés dans des chambres de stockage spéciales.

Pour les papiers reliés, les archives conservées en boîtes, les journaux, les revues etc..... le Conseil Canadien des Archives recommande un taux d'humidité compris entre 40 à 45 % pour une température de 18° C. En Grande-Bretagne le taux d'humidité ne doit pas dépasser 40 % pour une température de 18 °C. Aux États-Unis l'Institut Américain pour la Norme recommande un taux d'humidité de 25 à 30 % pour une température comprise entre 7°C et 18°C. La Bibliothèque nationale, qui est notre modèle en la matière, recommande pour le stockage en magasins les conditions suivantes : une humidité relative de 55 % $\pm$ 5 % pour une température 18 °C $\pm$ 1°C. En ce qui concerne des documents rares, précieux et fragiles, l'humidité recommandée est de 40 % $\pm$ 5 % pour une température de 18 °C $\pm$ 1°C.

La conservation des documents photographiques nécessite elle aussi des conditions de conservation spécifique. Pour les documents en noir et blanc l'humidité doit être de 35 % $\pm$ 5 % pour une température 12 °C $\pm$ 1°C. Pour les photos couleurs l'humidité est de 35 % $\pm$ 5 pour une température de 5 °C $\pm$ 1°C.

Nous connaissons les difficultés pour maintenir les réserves d'un bâtiment à une température stricte avec un écart de $\pm 1^\circ\text{C}$ et c'est pour cette raison que nous choisissons une tolérance de $\pm 2^\circ\text{C}$. ***Nous retiendrons donc les valeurs de référence ou Critères Climatiques de Conservation (CCC) :***

Humidité relative de 55% $\pm$ 5°C	(50% < HR < 60%)
Température sèche de 18°C $\pm$ 2°C	(16°C < T < 20°C)

Nous avons représenté sur le graphe suivant la position de la zone de tolérance humidité/température et la courbe d'apparition de l'*Apergillus versicolor* [Hens 2000] qui est représentative du développement d'un certain nombre de microorganismes, fig.12.

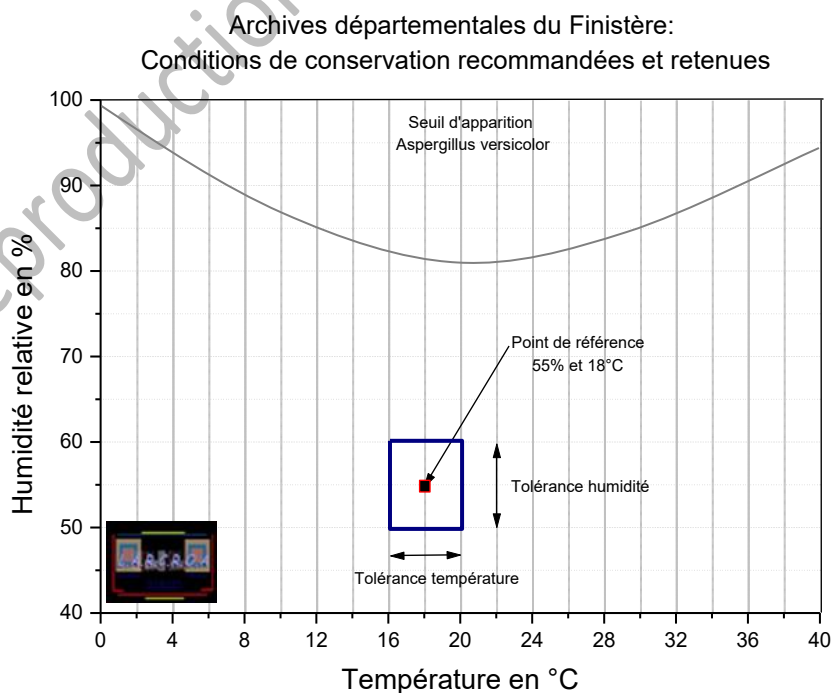


Fig.12 : Positionnement de la valeur de référence avec sa zone de tolérance
et la courbe apparition de l'*Apergillus versicolor*

C'est en fonction de ces paramètres de référence que l'analyse climatique va être menée. La cellulose (lignine et dérivés) est le principal matériau constitutif des archives en terme de masse et de volume. Elle n'est pas seulement un support idéal pour le développement des micro-organismes, mais c'est aussi un matériau hydrophile, sensible aux variations d'humidité et de température pouvant entraîner dans le temps des mécanismes de dégradation mécanique du papier. Sans atteindre les valeurs qui déclenchent l'éclosion des micro-organismes, aux fortes humidités et température, la cellulose est aussi chimiquement dégradée.

II-3-3 Valeurs statistiques

Nous allons nous appuyer pour l'analyse des résultats sur les valeurs statistiques suivantes :

Les minima, Mini

Les maxima, Maxi

La moyenne, Moy

L'écart type, σ : représente la dispersion des points autour d'une moyenne. Dans un ensemble de mesures on trouve 68% des valeurs comprises entre $\pm \sigma$ et 95% des valeurs pour une fourchette de $\pm 2\sigma$

II-4 ANALYSE DES ENREGISTREMENTS DU 1 AOÛT AU 2 DECEMBRE 2011

II-4-1 Analyse des données du climat extérieur.

Les données enregistrées ont été pointées sur le graphe à double ordonnée, fig.13 Les valeurs statistiques : maxima, minima, moyenne, écart type et variation maximale ont été calculées

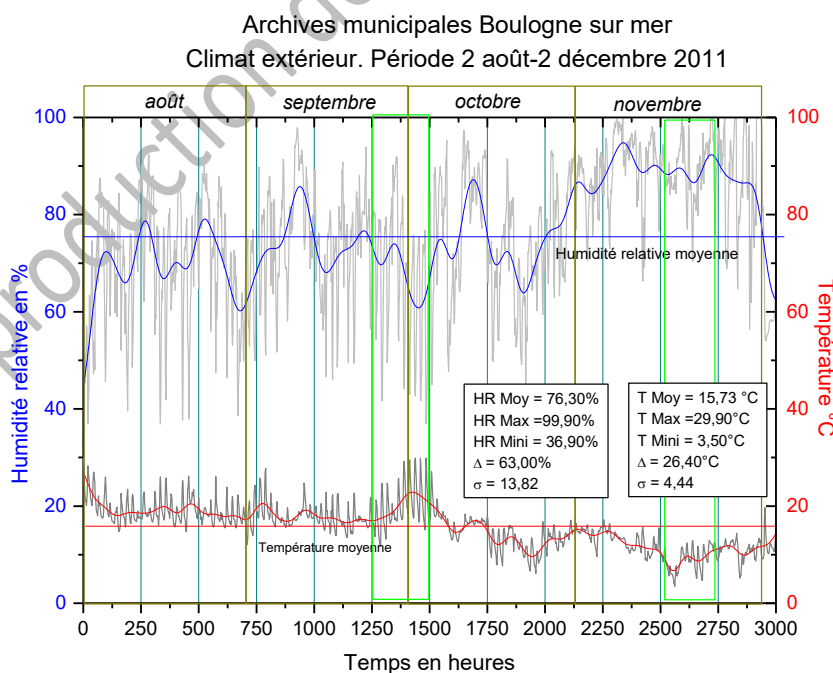
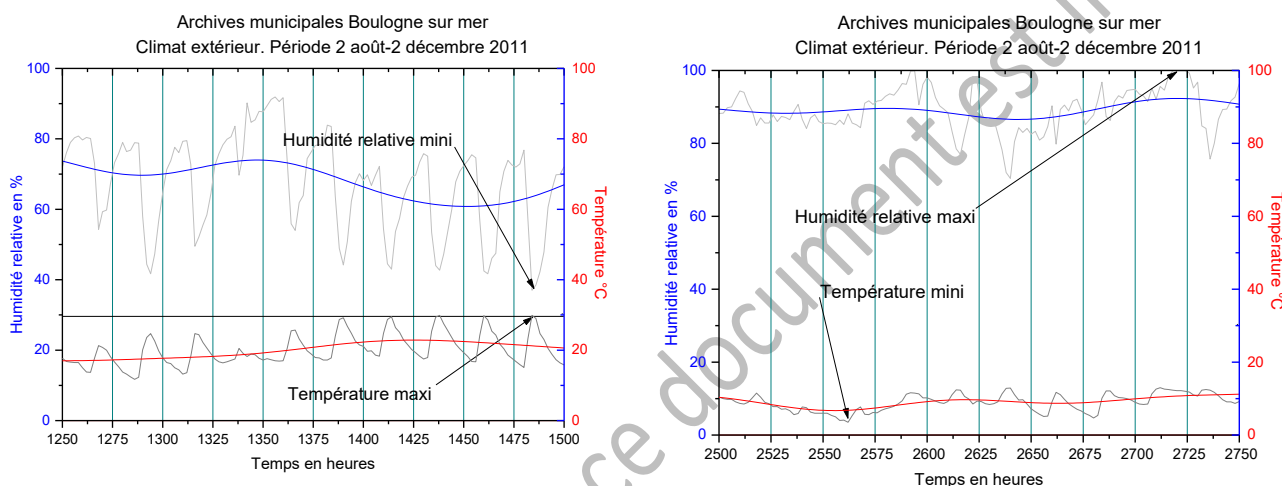


Fig. 13 : Enregistrement des variations de température et humidité relative extérieures

L'humidité moyenne est de 76,30 % avec une série de maxima à 99,9% au mois de novembre et un minimum de 33% en octobre. La variation maximale est de $\Delta = 66,90\%$. On peut considérer que les conditions hydriques extérieures au bâtiment des Archives sont humides. N'oublions pas que Boulogne sur mer est une ville côtière, qu'elle bénéficie d'un climat océanique. Les écarts d'humidité constatés quotidiennement correspondent à des variations diurnes et nocturnes où l'humidité la plus élevée se situe vers 5 du matin et décroît jusqu'à 17 heures. Ces cycles ne sont pas systématiques et dépendent des précipitations.

La température moyenne est de 15,74°C avec un maximum de 30,00°C° au début du mois d'octobre et un minimum de 3,5°C au mois de novembre. La variation maximale est de $\Delta = 26,5^\circ\text{C}$. Les variations diurnes et nocturnes sont plus systématiques en ce qui concerne les fluctuations de la température.



Les températures maxima et les humidités relatives minima se situent au mois de septembre et les humidités relatives maxima et températures minima au mois de novembre.

II-4-2 Analyse des données d'HR et de T des salles étudiées.

Considérations générales sur les moyennes HR et de T.

Les moyennes de HR et de T représentées par un point, sont encadrées par les écarts types, symbolisés par les barres verticales. La zone de tolérance est limitée par les lignes horizontales en pointillé, fig. 14.

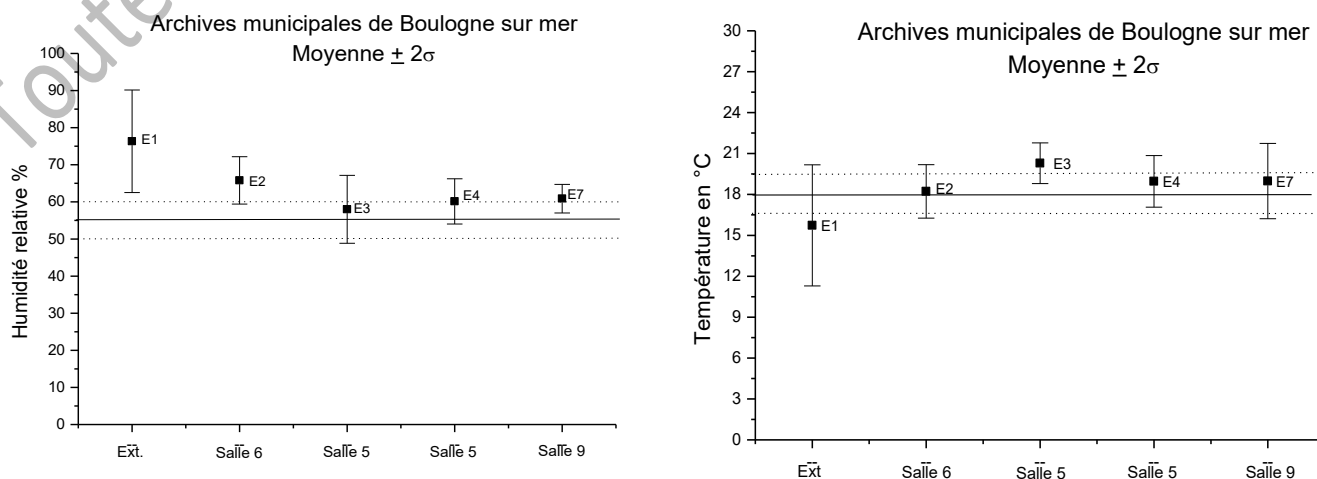


Fig. 14 : Moyenne des humidités relatives et des températures

Humidités relatives:

A l'extérieur, la valeur moyenne est de 76,32% et son écart type est important. Cette valeur est représentative du climat océanique qui baigne la ville.

Dans les salles : par rapport aux valeurs de référence $55\% \pm 5\%$, seul l'enregistreur E3 de la salle 5 a enregistré une valeur moyenne située dans la zone de tolérance. Les enregistreurs E4 de la salle 5 et E7 de la salle 9 ont des valeurs moyennes qui se trouvent à la limite de la zone de tolérance. L'enregistreur E2 se situe en dehors de cette zone à des humidités supérieures à 60%.

Ecart types HR:

Lorsque $\sigma < 2\%$, les valeurs s'écartent assez peu de la moyenne et les écarts d'humidité sont limités. Lorsque $\sigma > 3\%$, la dispersion des valeurs autour de la moyenne étant plus importante nous autorise à dire que le climat est instable. C'est le cas pour l'ensemble des salles étudiées.

Températures :

A l'extérieur la température moyenne est de 15,73°C. L'écart type de 4,44 témoigne que pendant la période d'enregistrement que d'importants écarts de température sont apparus.

Dans les salles les enregistrements des valeurs de E2 de la salle 6, E4 de la salle 5 et E7 de la salle 9 ont des moyennes qui se trouvent à l'intérieur ou à la limite de la zone de tolérance. E3 de la salle 5 a enregistré une valeur moyenne située hors de la zone de tolérance

Ecart type T :

D'une manière générale, en température, si l'écart type est inférieur à 2, la dispersion des points est faible, c'est le cas de tous les enregistreurs sauf de E7 dans la salle 9.

L'analyse de ces données traduit d'une part une absence d'homogénéité d'un magasin à l'autre et d'autre part une instabilité du climat dans l'ensemble des salles. On constate un manque de maîtrise des conditions climatiques des salles par rapport aux conditions de référence. D'une manière générale l'humidité et la température sont plus élevées qu'elles ne devraient l'être

III- ETUDE DU CLIMAT SALLE PAR SALLE

III-1 SALLE 6

	E2
Moyenne HR %	65,79
σ HR %	6,38
HR max %	86,30
HR mini %	46,70
Ecart maximum HR %	39,60
Moyenne T °C	18,22
σ T °C	1,96
T max °C	22,10
T mini °C	10,70
Ecart maximum T °C	11,40
Respect CCC en HR (°C)	7,68

III-1-1 Caractéristiques climatiques.

Les conditions climatiques qui règnent dans ce magasin sont :

- du point de vue de HR : La valeur moyenne des enregistrements en humidité relative est supérieure de plus de 10% à la valeur moyenne recommandée 55%. L'humidité relative maximale de 86,3% est beaucoup trop important dans un lieu de stockage de documents papiers. La valeur minimum est de 46,7 % ce qui nous fait des écarts de 39,60 %. Ces valeurs extrêmes sont préjudiciables à la conservation des archives.
- du point de vue des températures : la valeur moyenne de 18,22°C correspond quasiment à la valeur moyenne recommandée 18°C. Par contre les maxima et minima sont en largement en dehors des valeurs recommandées. L'écart de température des extrêmes est de 11,40°C ce qui témoigne d'une mauvaise régulation de la température.

Pour évaluer la qualité climatique de cette salle 6 au cours de la période de mesures (2 août au 2 décembre 2011), l'étude de la relation entre température et humidité nous permet de calculer les pourcentages de couples de valeurs HR/T répondant aux critères de conservation (zone rouge). Dans la salle 6 ils ne représentent que 7,68% de l'ensemble des valeurs, fig.15.

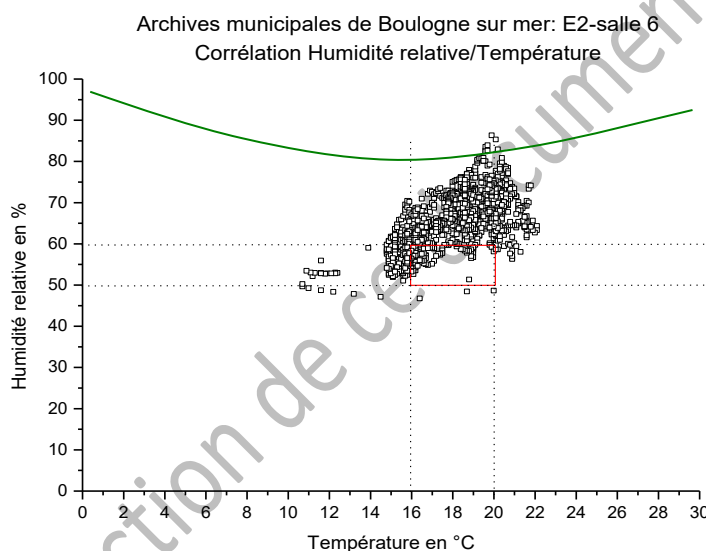


Fig. 15 : Corrélation humidité température

Seuls les points situés dans la zone rouge correspondent au CCC. Notons que des points se situent au dessus de la zone d'apparition de l'*aspergillus Versicolor* ou seuil de contamination des espèces microbiologiques. Dans cette salle les risques de développement de micro-organismes sont probables.

III-1-2 Comportement du climat vis-à-vis des facteurs externes.

Nous avons sur ce graphe l'humidité extérieure en gris et l'humidité du magasin étudié en bleu. La courbe de température en rouge est tracée à titre indicatif. Le rôle de la température qui varie de 22 à 18°C, sauf à la fin de l'enregistrement, est secondaire, fig. 16.

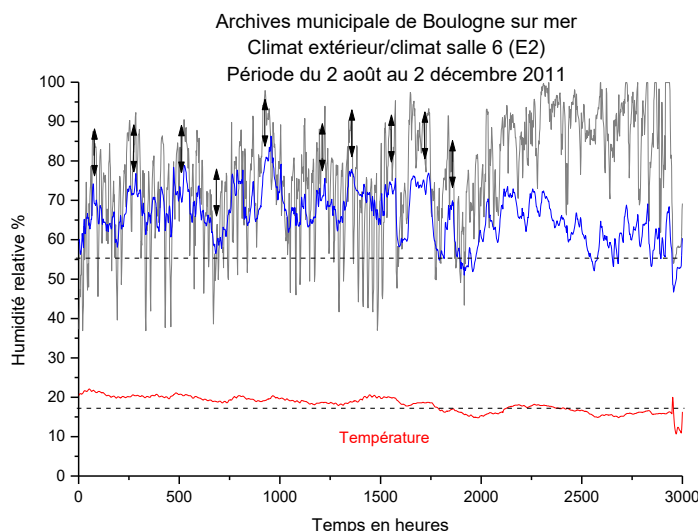


Fig. 16 : Superposition des climats extérieurs et de la salle 6.

Humidités relatives : Le parallélisme entre les fréquences des périodes humides du climat extérieur et les fluctuations du climat intérieur enregistrées par les capteurs témoigne d'une probable influence des conditions externes sur les conditions internes. Cette influence est plus marquée dans la première période de août à la fin octobre.

Température : Dans cette période la température est au dessus de 18°C et dépasse le maximum de température de la zone admise. Dans la seconde période fin octobre à décembre la température oscille autour de 18°C.

III-1 SALLE 5

	E3	E4
Moyenne HR %	60,13	57,99
σ HR %	6,11	9,15
HR max %	79,5	79,70
HR mini %	41 ,90	38
Ecart maximum HR %	37,6	41,7
Moyenne T °C	18,96	20,29
σ T °C	1,89	1,49
T max °C	22,9	24,40
T mini °C	10,40	10,50
Ecart maximum T °C	12,5	13,5
Respect CCC en %	11,52	32,18

E3 : bouche de soufflage air neuf

E4 : bouche d'aspiration air vicié

III-2-1 Caractéristiques climatiques.

Les conditions climatiques qui règnent dans cette salle sont :

- du point de vue de HR : Les valeurs moyennes enregistrées par les deux enregistreurs se trouvent dans la zone de tolérance. L'écart d'humidité relative moyenne entre E3 et E4 est de 2,14 % et correspond à une modification des conditions d'humidité relative. Les écarts types pour les valeurs des deux enregistreurs sont élevés ce qui exprime un manque de régulation de l'humidité.

- du point de vue des températures : les valeurs moyennes sont représentatives ($\sigma < 2$) mais elle est légèrement supérieure de la zone de tolérance pour E4. L'écart de température entre les deux enregistreurs est supérieur au °C ce qui témoigne d'un manque de régulation de la température.

En ce qui concerne l'étude température/humidité, les pourcentages de couples de valeurs répondant aux critères de conservation (zone rouge) sont représentés par les deux graphes, fig. 17.

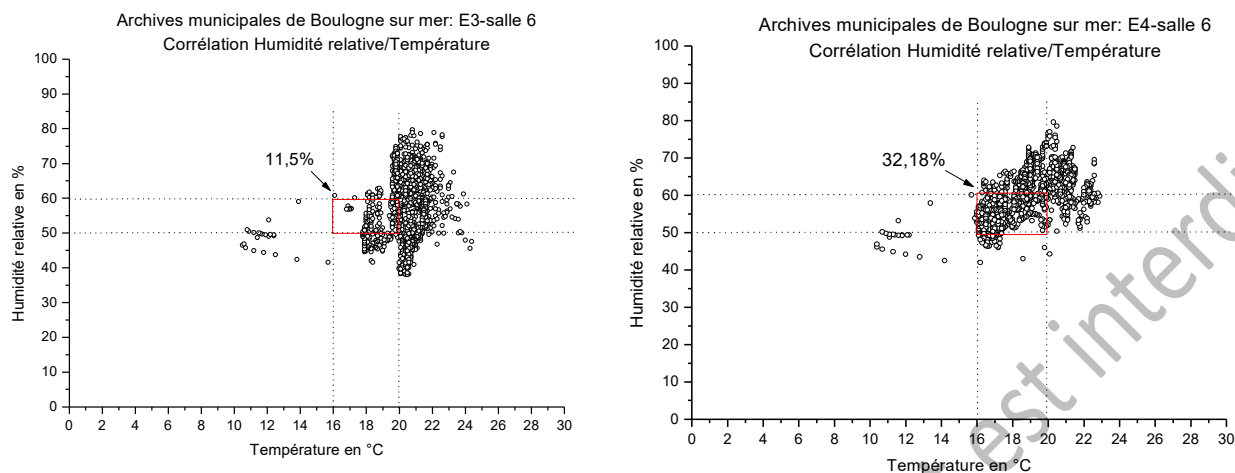


Fig.17 : Corrélation humidité température pour les deux enregistreurs E3-E4.

E3 situé sur la bouche de soufflage d'air neuf enregistre 11,52 % de couples de valeurs HR/T correspondant aux critères de conservation et E4 situé sur une bouche d'aspiration d'air vicié de la même salle en enregistre 32,18%. Le flux d'air qui se déplace donc d'un point à l'autre du magasin a subi une forte modification et les conditions de conservation se sont améliorées.

Les raisons de cette amélioration sont liées à une absorption hydrique.

Bien que tous les points de mesure restent en dehors du seuil de contamination des espèces microbiologiques certains d'entre eux en sont très proches. Un développement de micro-organismes peut survenir.

III-2-2 Comportement du climat vis-à-vis des facteurs externes.

Nous avons sur ce graphe l'humidité de l'extérieur en gris et l'humidité du magasin étudié en rouge pour E3 et bleu pour E4. Les courbes de température verte et cyan sont tracées à titre indicatif, fig. 18.

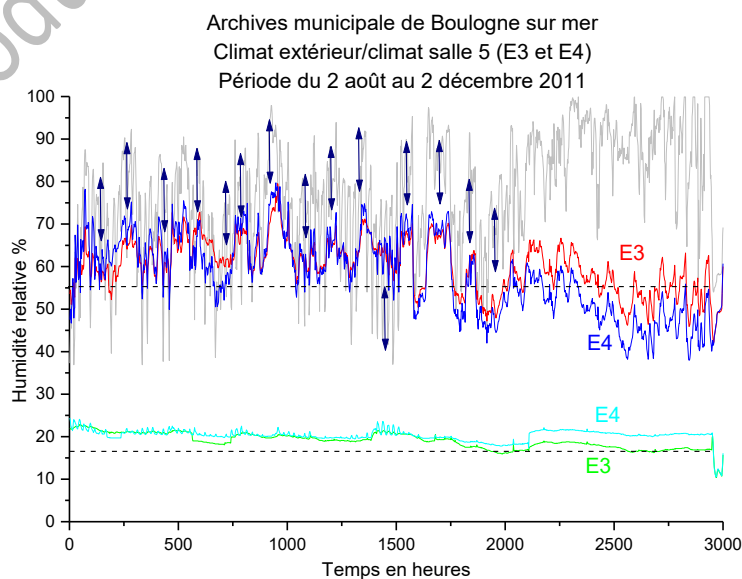


Fig. 18 : Superposition des climats extérieur et de la salle 5.

Humidité relative : Une première période allant de début août au milieu du mois d'octobre nous montre que les valeurs enregistrées par les capteurs E3 et E4 sont fortement influencées par les variations de l'humidité extérieure. A partir de la fin octobre bien l'humidité relative extérieure atteint ses valeurs les plus fortes alors que l'humidité relative, au niveau du soufflage d'air neuf et de l'aspiration d'air vicié oscille autour de 55%HR et ne paraît pas affectée par le climat extérieur. Cette dichotomie comportementale pendant la campagne d'enregistrement peut s'expliquer par une élévation de la température enregistrée par E4.

Température : L'enregistrement des températures de l'air vicié (E4) se situe au dessus de 20°C c'est-à-dire hors de la zone des critères climatiques de conservation alors que E3 lui est inférieur. Cette différence de température correspond à un réchauffement de l'air durant son passage dans la salle.

III-3 SALLE 9 (PREMIER ETAGE).

	E7 S	E8 perdu
Moyenne HR %	60,87	
σ HR %	3,85	
HR max %	71,30	
HR mini %	44,60	
Ecart maximum HR %	26,70	
Moyenne T °C	18,98	
σ T °C	2,76	
T max °C	23,90	
T mini °C	10,50	
Ecart maximum T °C	13,40	
Respect CCC en %	8,21	

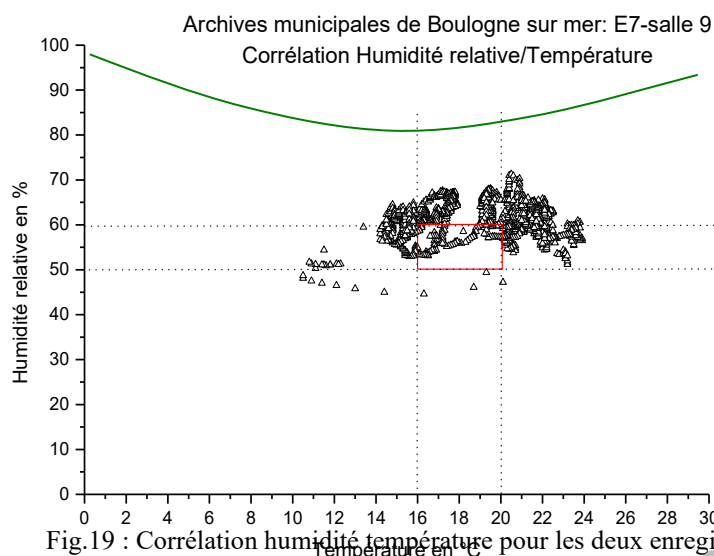
III-3-1 Caractéristiques climatiques.

Les conditions climatiques qui règnent dans ce magasin sont :

- du point de vue de HR : Les valeurs moyennes de l'enregistreur restant E7 se trouve légèrement au-dessus de la zone de tolérance. Néanmoins, l'écart type (3,85 %) et l'écart maximal entre les valeurs extrêmes (26,70%) témoignent, avec leurs valeurs élevées, d'un manque de régulation de l'humidité du magasin.

- du point de vue des températures : la valeur moyenne se situe dans la zone de tolérance mais les valeurs des écarts – type et valeurs extrêmes - reflètent le manque de régulation de la température du magasin.

Dans l'étude de l'humidité vis-à-vis de la température le pourcentage de couples de valeurs HR/T répondant aux critères de conservation (zone rouge) est représenté par le graphe, fig.19.



E7, situé sur la bouche d'entrée d'air neuf enregistre 8,21% des couples de valeurs correspondant aux critères de conservation. Les conditions de conservation ne sont pas respectées. La grande majorité des valeurs d'humidité sont au-dessus le 60%. Malgré tout l'ensemble des couples de valeurs sont en dessous du seuil de contamination des espèces microbiologiques. La perte du capteur 8 ne permet pas d'analyser l'évolution du volume d'air de cette salle au cours de la campagne de mesures.

III-3-2 Comportement du climat vis-à-vis des facteurs externes.

Nous avons sur ce graphe l'humidité de l'extérieur en gris et l'humidité du magasin étudié en bleu pour E7. La courbe de température tracée en rouge est à titre indicatif, fig.20

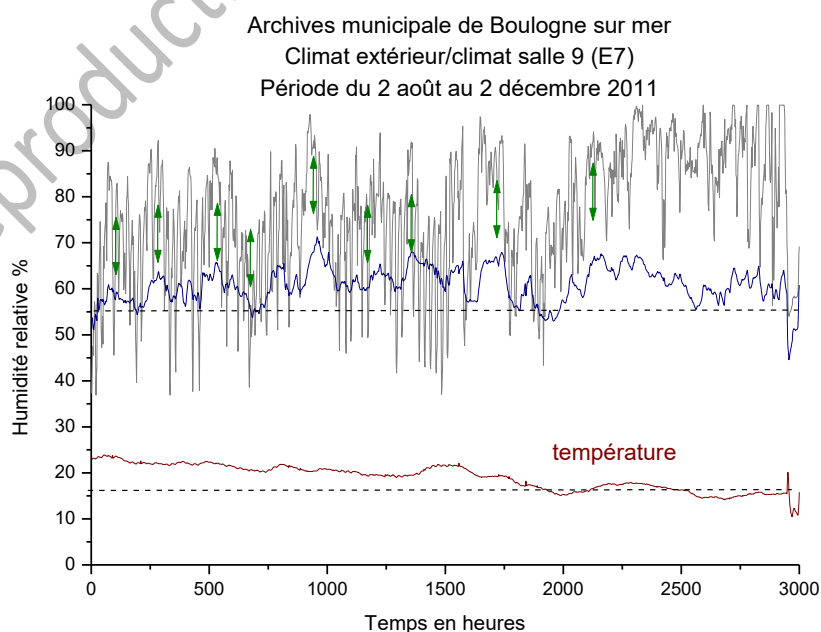


Fig. 20 : Superposition des climats extérieur et de la salle 9.

Humidités relatives : Les variations d'humidité de l'enregistreur E7 placé au niveau d'une bouche de soufflage d'air neuf se situent au dessus de 55%. En comparant les variations de l'humidité extérieure et celles de la salle 9 nous pouvons constater qu'il y a une concordance fluctuations. Le climat de la salle est incontestablement conditionné par le climat extérieur.

Températures : Les températures de l'air soufflé sont supérieures à 18°C jusqu'à 2000 heures. Elles se stabilisent autour de cette valeur par la suite. La température ne semble être pas trop affectée par le climat extérieur.

III-4 COMPOTEMENT CLIMATIQUE DES MAGASINS PAR RAPPORT AUX CONDITIONS EXTERNES

La campagne de mesures des trois salles instrumentées (salles : 5, 6, 9) a permis de caractériser le comportement climatique de ces salles. Le climat des trois salles présente une instabilité générique qui est liée à l'installation du système de renouvellement de l'air. L'influence du climat extérieur n'est pas maîtrisée et ce système crée à l'intérieur des salles un climat qui d'une manière générale est trop humide, instable et ne répond pas à la qualité climatique nécessaire pour la conservation des archives. Ces résultats résument probablement le comportement climatique de l'ensemble des magasins.

IV ANALYSE DES DONNEES DES ENREGISTREURS PLACES DANS LES BOITES D'ARCHIVES.

Les archives représentent une masse importante de matière cellulosique à caractère hydrophile. Afin d'évaluer l'impact des climats des salles sur les documents d'archives, nous avons pris des mesures ponctuelles et fait un suivi durant les 4 mois de la teneur en vapeur eau, dans certaines boites d'archives.

IV-1 CAMPAGNES DE MESURES DU 01/08/2011 ET DU 02/12/2011

Les mesures ont été faites avec TESTO 650 et une sonde sabre spéciale pour papier, fig.21.



Fig.21 : Mesures ponctuelles d'humidité à l'extérieur et dans les documents.

Les résultats sont regroupés dans les deux tableaux suivants.

n°boite	Extérieur			Intérieur			HA ₂ - HA ₁
01/08/2011	HR ₁ %	T °C	HA ₁ g/m ³	HR ₂ %	T °C	HA ₂ g/m ³	g/m ³
SALLE 6							
1284	55,6	20,9	10,1	58,2	20,6	10,4	0,3
1278	57,9	20,3	10,2	60	19,9	10,3	0,1
4F-boulangerie 1920-1930	57,4	20,4	10,2	59,5	19,9	10,2	0
1995 hôpital	58,3	20,2	10,1	58,6	20	10,1	0
1468	56,4	20,4	10	62	19,8	10,6	0,6
D1989	55,6	20,5	9,9	62	19,8	10,6	0,7
D1984	55,6	20,2	9,8	60,3	19,4	10,1	0,3
SALLE 5							
1038	53,4	22,5	10,7	58,6	21,1	10,8	0,1
1906-1910 législation	53,8	22,4	10,7	59,1	20,9	10,8	0,1
SALLE 9							
35W745 à 35W757	54,3	22,1	10,6	60,4	20,7	10,7	0,1
54W2	54,5	22,2	10,7	59,6	20,7	10,7	0
37W8 à 37W9	53,5	22,3	10,6	56,1	21,5	10,6	0
54W277 à 54W278	53,5	22,3	10,6	56,1	21,6	10,7	0,1
23W179 à 23W180	50,6	23,1	10,5	54,5	22,1	10,7	0,2
3W114	50,1	22,2	10,4	54	22,1	10,6	0,2

n°boite	Extérieur			Intérieur			HA ₂ - HA ₁
02/12/2011	HR ₁ %	T °C	HA ₁ g/m ³	HR ₂ %	T °C	HA ₂ g/m ³	g/m ³
SALLE 6							
1284	55,1	16,2	7,6	58,2	16,1	8	0,4
1278	53,6	16,4	7,6	59,9	16,1	8,2	0,6
4F-boulangerie 1920-1930	52,3	17,5	8,2	56,2	16,5	7,9	-0,3
1995 hôpital	55,6	16,5	8	58,4	16,5	7,9	-0,1
1468	55,4	15,8	7,5	62	15,6	8,3	0,8
D1989	54,4	16,5	7,6	59,6	15,9	8,1	0,5
D1984	54,1	16,4	7,6	59,4	15,8	8,2	0,6
SALLE 5							
1038	49,9	17,1	7,3	56,4	16,5	8	0,7
1906-1910 législation	52,6	17	7,6	59,2	16,1	8,2	0,6
SALLE 9							
35W745 à 35W757	53,8	16,9	7,9	61,2	16,1	8,4	0,5
54W2	56,9	16,5	8	63,2	15,4	8,3	0,3
37W8 à 37W9	56,8	16,4	8	64,4	14	8,2	0,2
54W277 à 54W278	55,9	16,6	7,9	64,7	14,7	8,2	0,3
23W179 à 23W180	55,1	16,8	7,9	59,4	15,6	7,9	0
3W114	54,7	16,9	7,9	59,4	15,6	7,9	0

A partir de l'humidité relative et la température la valeur de l'humidité absolue (HA) ou (x) a pu être calculée. HA s'exprime en g/m³ ou en g/ kg d'air sec, elle représente la quantité de vapeur d'eau dans l'air ambiant ou l'espace confiné des boîtes.

Dans la dernière colonne du tableau nous avons calculé la différence de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur de la boîte. Lorsque les résultats sont positifs cela veut dire que la quantité d'eau dans la boîte est supérieure.

IV-1-1 Interprétation des résultats.

Pour des écarts (H_2-H_1) inférieurs à $0,3 \text{ g/m}^3$ on considère arbitrairement que l'on a des quantités de vapeur d'eau à l'intérieur et à l'extérieur des boîtes d'archives quasiment équivalentes.

Dans les mesures prises en été 2011 il y a quatre boîtes dans la salle 6 où les écarts sont supérieurs à cette valeur. Ce sont les boîtes – 1284, 1468, D1989, 1984. La quantité de vapeur d'eau à l'intérieur de ces boîtes est donc supérieure à la quantité vapeur d'eau à l'extérieur et plus particulièrement pour les boîtes 1468 et D 1989.

Dans les mesures prises le 2 décembre 2011, dix boîtes ont des valeurs (H_2-H_1) supérieures à $0,3 \text{ g/m}^3$ ce qui représente les 2/3 des boîtes.

Cette humidité dans les boîtes s'explique par le phénomène d'hystérésis qui caractérise les courbes d'absorption et de désorption de la cellulose. La vitesse de désorption de vapeur étant plus lente que la vitesse d'absorption, le papier absorbe rapidement l'humidité extérieure ce qui augmente l'humidité relative de la boîte et comme la désorption est moins aisée l'humidité reste confinée.

IV-2 SUIVIS DE L'HUMIDITE ABSOLUE A L'INTERIEUR ET A L'EXTERIEUR DES BOITES 175BA119 (SALLE 5) ET 35W1753 (SALLE 9) PENDANT 4 MOIS.

Deux petits enregistreurs TESTO 171 ont enregistré les valeurs d'humidité relative et de température dans deux boîtes – 175BA119 et 35W1753, pendant les quatre mois de ma campagne de mesures, fig. 22.



Fig. 22 : Enregistreur placé dans une boîte d'archives.

Pour la boîte 175BA119 de la salle 5 les résultats sont présentés sous forme de courbes. Ils regroupent les valeurs d'humidité relative à l'extérieur enregistrées par E3 et E4 en bleu et vert et du capteur dans la boîte en rouge et les courbes de températures, fig.23.

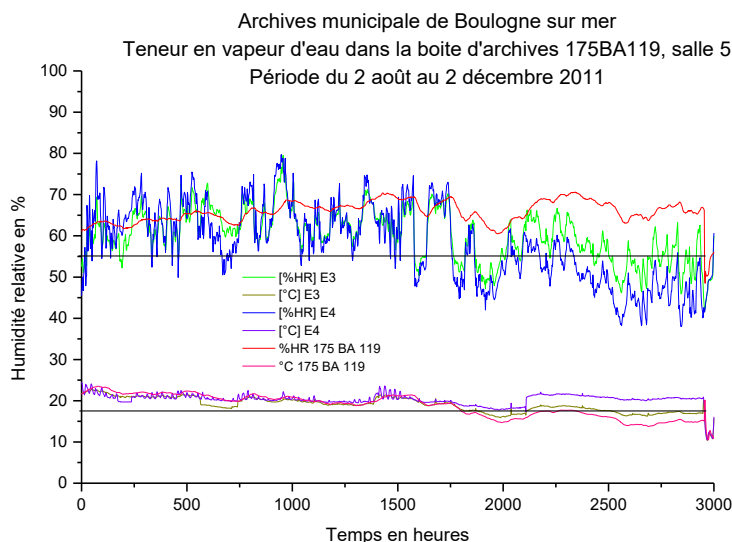


Fig. 23 : Superposition courbes d'humidité relative de la salle 5 et de la boîte 175BA119.

A l'extérieur de la boîte, les variations de l'humidité relative de l'air sont caractérisées par des amplitudes fortes et fréquentes. A l'intérieur de la boîte, en réponse à ces variations extérieures nous avons des variations de l'humidité relative plus pondérées et un déphasage dans le temps. Cette différence de comportements hydriques à l'extérieur et à l'intérieur de la boîte est la conséquence d'une absorption d'eau par les documents d'archives avec un décalage dans le temps.

Pour la boîte 35W1753 de la salle 9 les résultats sont présentés sous forme de courbes. Ils regroupent les valeurs de l'humidité relative à l'extérieur de la boîte enregistré par E7 et celles du capteur dans la boîte, fig. 24.

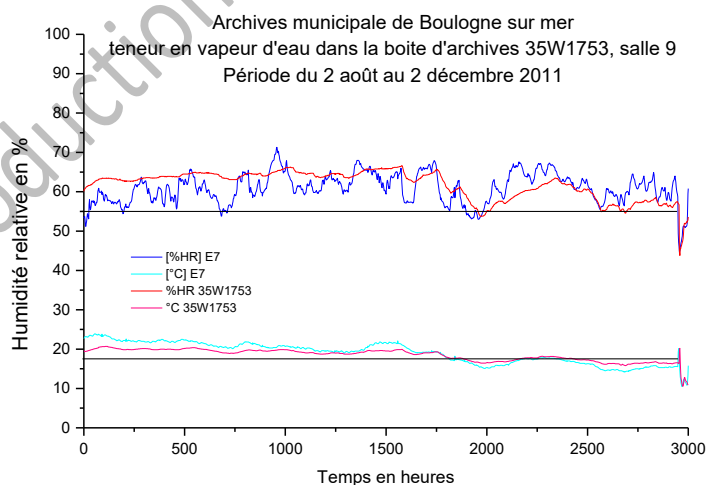


Fig. 24 : Superposition courbes d'humidité relative de la salle 9 et de la boîte 35W1753.

L'observation du même phénomène de diminution des variations de la teneur en vapeur d'eau dans cette boîte permet de supposer qu'il peut s'étendre aux autres boîtes. Autrement dit il suffit que les conditions climatiques extérieures changent pour l'humidité relative des boîtes soit modifiée.

IV-2-1 Interprétation des résultats.

L'étude du climat des salles 5, 6, 9 a démontré clairement que l'installation d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) double flux, n'est suffisant pour réguler le climat des magasins d'archives. Cet équipement technique n'est d'ailleurs pas conçu pour créer les conditions climatiques en humidité et en température favorables à la conservation des documents d'archives. Il est trop dépendant des conditions climatiques extérieures.

On a pu constater que l'humidité est trop élevée et que ses variations sont trop brusques et importantes. Les variations de températures ne semblent pas être reliées directement aux fluctuations hydriques. Le rôle de la température dans la régulation du climat est très limité.

L'étude du climat à l'intérieur des boîtes a permis de vérifier qu'une partie de l'humidité des salles était absorbée par le contenu papier des boîtes. Ce phénomène est préjudiciable à la conservation d'une collection d'archives car il ne faut pas oublier que les matériaux, à base de cellulose et de ses dérivés, sont hygroscopiques. Ils absorbent ou désorbent une partie de la vapeur d'eau présent dans le milieu jusqu'à un certain équilibre que l'on appelle « teneur en eau à l'équilibre ». Le taux d'absorption est plus rapide que le taux de désorption. Ces échanges de vapeur d'eau se font en continu dans les matériaux et entraînent des variations dimensionnelles.

Une humidité relative supérieure à 65% provoque un gonflement et induit des réactions d'hydrolyse. En dessous de 40% HR les matériaux se rétractent entraînant des sur-contraintes dans les matériaux. Les variations d'humidité ou de températures sont responsables d'une fatigue mécanique qui à long terme entraîne une décohésion des matériaux.

Outre le maintien de l'humidité et de la température dans la zone de tolérance définie il faut que l'humidité et la température soient uniformes, toutes variations brusques sont délétères.

Dans le suivi climatique des salles d'archives, nous avons pu noter que l'humidité et la température s'approchaient sérieusement de la courbe d'apparition de l'*Aspergillus versicolor* laissant la possibilité aux micro-organismes de se développer.

V- ETUDE DE LA BIOCONTAMINATION.

V-1 ETAT DES LIEUX

Lors de notre visite de juin 2011, nous avons pu constater l'étendue et la configuration de la biocontamination des magasins des archives municipales de Boulogne-sur-Mer.

Celle-ci semble toucher tous les magasins du bâtiment d'archives qui se compose de deux étages divisés en sept salles au rez-de-chaussée et en deux salles au premier étage. La contamination fongique observée est discrète et semble toucher préférentiellement les reliures toilées et les parties textiles des documents (sangles des dossiers d'archives). Des contaminations sans doute anciennes peuvent également être relevées en corps d'ouvrages. En revanche, aucun développement fongique n'a été observé sur boîtes de conservation. En environnement, des traces de développements fongiques sont visibles au niveau de quelques murs au rez-de-chaussée et sur les boulons des compactus.

V-2 ECHANTILLONNAGE

Aux points d'échantillonnages, les prélèvements réalisés sont de deux types :

- Surfaces (étagères, murs, sols, documents).
- Air.

Ces types de prélèvements permettent de rendre compte de situations complémentaires, le premier en permettant la caractérisation (en termes quantitatifs et qualitatifs) de la flore microbiologique sédimentée avec le temps et le second la caractérisation de la flore microbiologique prépondérante au moment de l'étude.

Tous les échantillons constituant la présente étude ont été prélevés le même jour, le 1^{er} août 2011.

Les zones d'échantillonnage (section II.2.) ont été définies afin de parvenir à une vision la plus globale possible de la situation fongique dans l'ensemble du bâtiment sans avoir à mettre en place une analyse exhaustive. Une étude climatique étant menée en parallèle, les salles équipées de thermo-hygromètres ont été privilégiées. Il a donc été décidé de procéder à l'échantillonnage dans les zones suivantes :

- Sur les deux étages, en environnement (air et surfaces) et sur documents.
- En système de ventilation, au niveau des bouches de soufflage et de reprise d'air (surfaces).
- En environnement extérieur (air).

VI-2-1 Prélèvements et méthodes

Afin de bénéficier de points de comparaison, les différents échantillons ont été mis en culture sur milieux équivalents : milieux de type flore totale et DRBC.

Les prélèvements sur documents ont été réalisés par frottis des surfaces à l'aide d'écouvillons stériles. La surface échantillonnée a été fixée à 1cm² afin de permettre une comparaison entre échantillons.

La mise en culture a été effectuée par dépôt direct en stries à la surface des milieux de culture le lendemain du prélèvement. Les milieux de culture utilisés sont des milieux

Sabouraud (Difco – composition : malt (40g/L) / agar (15g/L) / digestat enzymatique de caséine (10g/L)) pour la croissance de la flore totale, préparés la veille du prélèvement.

Les prélèvements de surfaces ont été réalisés par application pendant environ 10s, de lamelles contact gélosées sur les zones définies. Ces lames présentent un type de milieu par face :

Face 1, milieu PCA, pour le développement de la flore totale, tant fongique que bactérienne.

Face 2, milieu DRBC (Dichloran Rose Bengal Chloramphénicol), à faible activité en eau et additionnée d'un antibiotique, pour le développement des espèces xérotolérantes et inhibition des espèces bactériennes.

Le transport des lames a été effectué à température ambiante. Elles ont été précédemment stockées selon les recommandations du fabricant, jusqu'au matin du départ.

Les prélèvements d'air ont été réalisés par impaction à l'aide d'un biocollecteur SAS IAQ (conforme à la norme EN ISO 14698) d'un débit de $100\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ positionné à 1,5m du sol, sur milieux gélosés Sabouraud. Le volume d'air échantillonné est de 500L (correspondant à une prise de 5min).

Les milieux sont préparés par dissolution dans l'eau du produit déshydraté, chauffage sous agitation constante, autoclavage à 121° pendant 15mn, puis coulés en boîtes de Pétri stériles, dans le champ d'un bec bunsen.

Les milieux fraîchement préparés au laboratoire ont été stockés au réfrigérateur, à 4°C , et transportés à température ambiante afin d'éviter les condensations et les mouvements de films d'eau pouvant interférer avec les processus d'impaction et d'ensemencement.

Un échantillon de chaque milieu a été préparé pour contrôle de la stérilité des phases de fabrication et de transport. Pour les impactions, les boîtes témoins négatifs ont été transportées sur place et mises en culture sans impaction.

Tous les échantillons de surfaces et d'air ont été mis en culture le soir même du prélèvement, par incubation à 25°C en enceinte (enceinte à régulation électronique Memmert SE200). Les échantillons écuvillonnés ont été mis en culture le lendemain du prélèvement.

V-2-2Prélèvements : localisation

La politique d'échantillonnage proposée est basée sur les recommandations de l'ASPEC. Ces recommandations ont été adaptées à la situation particulière des réserves des archives de Boulogne et au besoin de rapporter le nombre de prélèvements à des quantités manipulables.

La présente étude repose sur un total de 39 échantillons dont 18 échantillons de surface en environnement (4 en système de ventilation, 5 sur murs en magasins, 3 au sol en magasins, 6 sur étagères); 4 échantillons d'air et 17 échantillons sur documents. Comme spécifié précédemment, l'étude a été concentrée sur les salles 5 et 9 équipées de thermo-hygromètres.

Les échantillons ont été répartis comme suit dans chacune des salles retenues :

REZ DE CHAUSSEE, fig.27.

Extérieur : 1 échantillon

1 prélèvement d'air à proximité des bouches d'entrée d'air (A1).

Garage : 3 échantillons

- 1 prélèvement sur mur, opposé à l'entrée, à hauteur $h = 1,5\text{m}$ (M5).
- 1 prélèvement sur étagère haute, à hauteur $h \sim 2\text{m}$ (E6), en zone contaminée et zone de prélèvements sur mur.
- 1 prélèvement d'air au centre de la pièce (A4).

Salle 5 : 16 échantillons

- 2 prélèvements au sol au niveau des travées 1 (S1) et 4 (S2).
- 2 prélèvements sur murs à hauteur $h = 1,5\text{m}$ (M1 et M2), dans les zones de prélèvement au sol.
- 2 prélèvements sur étagères médianes, à hauteur $h \sim 1,5\text{m}$ (E1 et E2), dans les zones de prélèvement au sol.
- 2 prélèvements au niveau des bouches d'arrivée et de reprise d'air du système de ventilation (C1 et C4).
- 1 prélèvement d'air au centre de la pièce – travée 4 (A2).
- 7 prélèvements sur documents et boîtes, en accord entre zones non contaminées/contaminées et zones de prélèvements en environnement (D1 à D7).

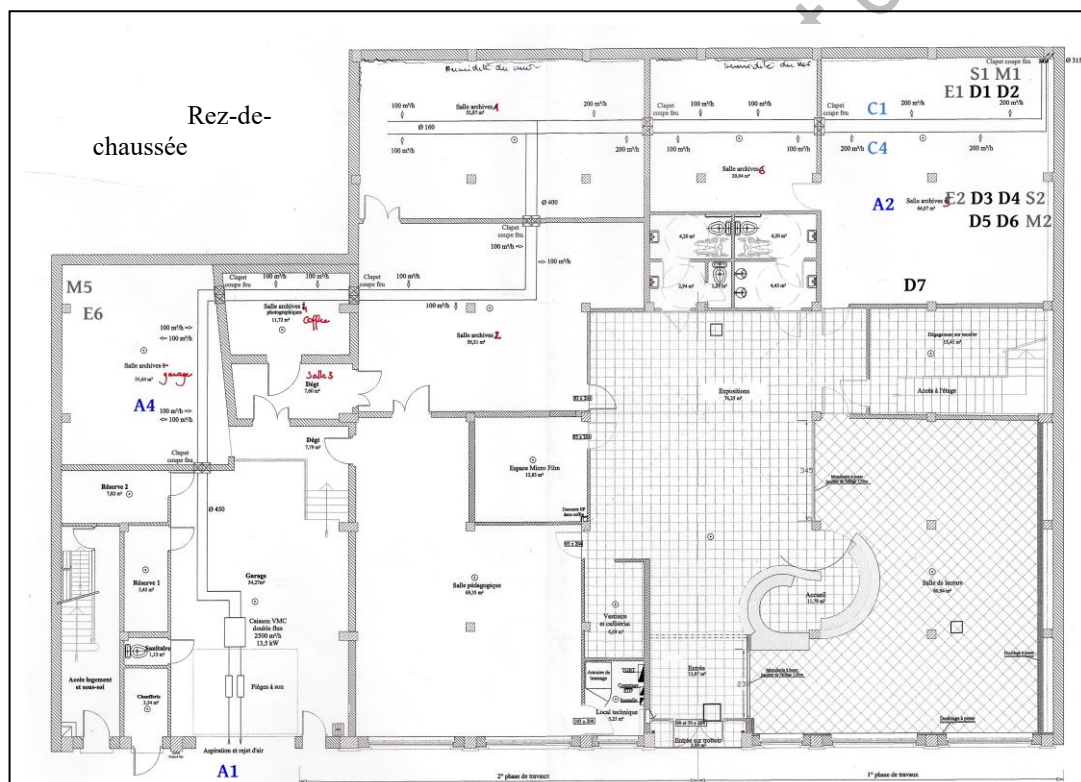


Fig.27 : Localisation des prélèvements rez de chaussée.

PREMIER ETAGE fig.28.**Salle 8 : 8 échantillons**

- 1 prélèvement sur mur, pilier central, à hauteur $h = 1,5\text{m}$ (M4).
- 1 prélèvement sur étagère médiane en zone contaminée et zone de prélèvement sur mur (E5).
- 6 prélèvements sur documents et boîtes, en accord entre zones non contaminées/contaminées et zones de prélèvements en environnement (D12 à D17).

Salle 9 : 13 échantillons

- 1 prélèvement au sol dans la zone opposée à l'entrée (S3).

1 prélèvement sur mur à hauteur $h = 1,5\text{m}$ (M3), dans la zone de prélèvement au sol.

2 prélèvements sur étagères hautes, à hauteur $h \sim 2\text{m}$ (E3 et E4), dans les zones de prélèvement au sol.

2 prélèvements au niveau des bouches d'arrivée et de reprise d'air du système de ventilation (C2 et C3).

1 prélèvement d'air au centre de la pièce (A3).

4 prélèvements sur documents et boîtes, en accord entre zones non contaminées/contaminées et zones de prélèvements en environnement (D8 à D11).

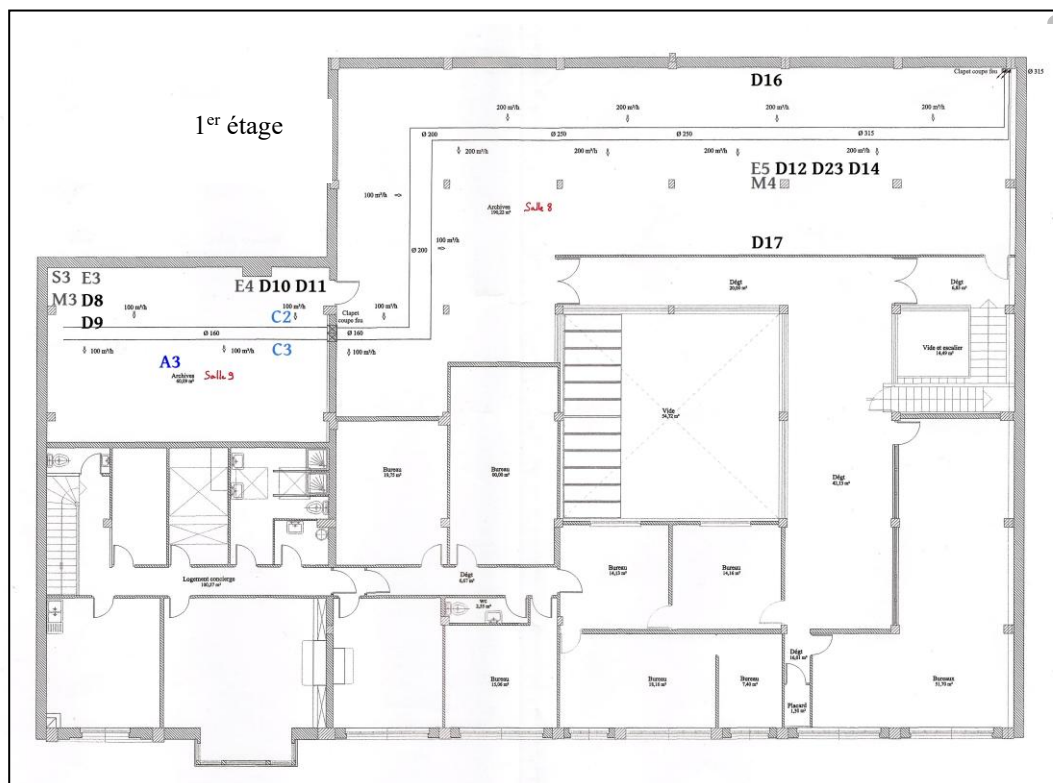


Fig.28 : Localisation des prélèvements, 1^{er} étage.

V-2-3 Résultats

Niveaux de contamination en environnement.

Echantillon	Salle	Localisation	Surface échantillonnée	Développement visuel	Comptages								Identification
					J+1 MEA	+1 DRBC	J+3 MEA	J+3 DRBC	J+7 MEA	J+7 DRBC	J+14 MEA	J+14 DRBC	
S1	Salle 5	Sol	2,5cm²	Douteux - Dépôts de poussières	13 bact 0		40 bact 0	11	40 bact 0	11	40 bact 0	11	Cladosporium cladosporoides Paecilomyces variotti Fusarium solani
S2	Salle 5	Sol	2,5cm²	Douteux - Dépôts de poussières	26 bact 0		20 bact 0	0	20 bact 0	2	20 bact 0	36	Acremonium strictum Aspergillus penicillioides Mucor plumbeus Paecilomyces variotti Penicillium chrysogenum Phialophora hoffmannii
S3	Salle 9	Sol	2,5cm²	Non	2 bact 0		14 bact 2	0	14 bact 3	4	14 bact 10	4	Cladosporium cladosporoides Fusarium solani
M1	Salle 5	Mur 1,5m	2,5cm²	Non	3 bact 0		11 bact 0	0	11 bact 0	0	11 bact 3	0	Paecilomyces variotti
M2	Salle 5	Mur 1,5m	2,5cm²	Non	0		0	0	0	0	1	1	Penicillium brevicompactum
M3	Salle 9	Mur 1,5m	2,5cm²	Non	0		0	0	1	1	1	1	Acremonium strictum
M4	Salle 8	Mur 1,5m	2,5cm²	Non	0		19 bact 1	0	confluence bact 1	0	confluence bact 2	0	Levure
M5	Salle 1	Mur 1,5m	2,5cm²	Non	0		0	0	136	154	136	154	Paecilomyces variotti
E1	Salle 5	Etagère médiane	2,5cm²	Dépôts de poussières	0		11 bact 7	5	11 bact 9	5	11 bact 9	7	Mucor plumbeus Penicillium chrysogenum Phialophora hoffmannii
E2	Salle 5	Etagère médiane	2,5cm²	Dépôts de poussières	11 bact 0		28 bact 0	3	28 bact 0	4	28 bact 0	6	Acremonium strictum Phialophora hoffmannii
E3	Salle 9	Etagère haute	2,5cm²	Dépôts de poussières	0		20 bact 7	6	20 bact 7	6	20 bact 7	6	Cladosporium cladosporoides Paecilomyces variotti Phialophora hoffmannii

Echantillon	Salle	Localisation	Surface échantillonnée	Développement visuel	Comptages	Identification								
					J+1 MEA	J+1 DRBC	J MEA	DRBC	+7 MEA	+7 DRBC	J+14 MEA			
E4	Salle 9	Etagère haute	2,5cm²	Dépôts de poussières	0	0	23 bact 2	3	Confluence bact 2	3	Confluence bact 4	3	Acremonium strictum Fusarium solani Phialophora hoffmannii	
E5	Salle 8	Etagère médiane	2,5cm²	Dépôts de poussières	6 bact 0	0	0 bact 10	12	Confluence bact 10	15	confluence bact 10	15	Cladosporium cladosporoides Epicilomyces variotti Phialophora hoffmannii	
E6	Salle 1	Etagère haute	2,5cm²	Dépôts de poussières	0	0	14	15	17	21	17	21	Cladosporium cladosporoides Fusarium solani Penicillium chrysogenum Scopulariosis brevicaulis	
C1	Salle 5	Bouche d'arrivée d'air	2,5cm²	Dépôts de poussières	12 bact 0	0	12 bact 16	10	12 bact 16	11	12 bact 16	13	Acremonium strictum Fusarium solani Penicillium chrysogenum Phialophora hoffmannii	
C2	Salle 9	Bouche d'arrivée d'air	2,5cm²	Dépôts de poussières	1 bact 0	0	1 bact 9	7	1 bact 9	8	1 bact 9	10	Acremonium strictum Cladosporium cladosporoides Penicillium brevicompactum Monascus ruber	
C3	Salle 9	Bouche de reprise d'air	2,5cm²	Dépôts de poussières	5 bact 0	0	21 bact 2	3	21 bact 2	9	21 bact 2	9	Aspergillus ochraceus Cladosporium cladosporoides Phialophora hoffmannii Penicillium chrysogenum Penicillium corylophilum	
C4	Salle 5	Bouche de reprise d'air	2,5cm²	Dépôts de poussières	0	0	10	14	10	14	10	14	Aspergillus ochraceus Cladosporium cladosporoides Emericella nidulans Penicillium corylophilum Scopulariosis brevicaulis	
Echantillon	Salle	Localisation	Surface échantillonnée	Développement visuel	Comptages				Identification					
					J+1 MEA	J+3 MEA	J+7 MEA		J+14 MEA					
A1	Extérieur	Hauteur 1,5m	500L	-	6 bact 0	792	792				Acremonium strictum Cladosporium cladosporoides Epicoccum nigrum Monascus ruber Paecilomyces variotti Phialophora hoffmannii Scopulariosis brevicaulis			
A2	Salle 5	Hauteur 1,5m	500L	-	0	62	62 (2 envahissants)							
A3	Salle 9	Hauteur 1,5m	500L	-	0	21	21 (2 envahissants)							
A4	Salle 1	Hauteur 1,5m	500L	-	0	336	336							

Niveau de contamination sur documents

Echantillon	Salle	Localisation	Surface échantillonnée	Développement visuel	Comptages				Identification
					J+1 MEA	J+3 MEA	J+7 MEA	J+14 MEA	
D1	Salle 5	Chauffage 1850-1852 - Dos de couverture	1cm ²	Oui – Dépôts blancs et colonies crèmes, rondes	0	2	2	55	Acremonium strictum Monascus ruber Phialophora hoffmannii Penicillium chrysogenum
D2	Salle 5	Chauffage 1850-1852 - Feuillet intérieur	1cm ²	Non – Empoussièrement et auréoles	0	4	10	20	Absidia corymbifera Cladosporium cladosporoides Mucor plumbeus Talaromyces macrosporus
D3	Salle 5	Sans identifiant - Dos de couverture	1cm ²	Oui – Duvet blanc	0	1	10	10	Cladosporium cladosporoides Monascus ruber
D4	Salle 5	119-Foires 1900/1904 - Boîte	1cm ²	Non – Empoussièrement	0	4	5	22	Cladosporium cladosporoides Penicillium corylophilum Phialophora hoffmannii Scopulariopsis brevicaulis
D5	Salle 5	119-Foires 1900/1904 - Feuillet intérieur	1cm ²	Non	0	0	1	6	Cladosporium cladosporoides
D6	Salle 5	Comptabilité D6 1933 n°1 - Tranche de tête	1cm ²	Oui – Empoussièrement et colonies brunes, de petites tailles	0	4	6	66	Eurotium herbariorum Cladosporium cladosporoides Monascus ruber Mucor plumbeus Paecilomyces variotti Penicillium chrysogenum
D7	Salle 5	1F132 - Feuillet intérieur	1cm ²	Non	0	0	0	9	Aspergillus penicillioides Eurotium herbariorum Fusarium solani
D8	Salle 9	37W31 - Intérieur de la boîte - Dos toilé	1cm ²	Douteux – Taches brunes	0	2	2	10	Cladosporium cladosporoides
D9	Salle 9	35W1753 à 35W1760 - Intérieur de la boîte - Dos toilé	1cm ²	Non	0	0	0	14	Cladosporium cladosporoides Paecilomyces variotti Penicillium chrysogenum Penicillium corylophilum Phialophora hoffmannii

Echantillon	Salle	Localisation	Surface échantillonnée	Développement visuel	Comptages				Identification
					J+1 MEA	J+3 MEA	J+7 MEA	J+14 MEA	
D10	Salle 9	59W58 - Plat inférieur toilé	1 cm ²	Oui – Colonies duveteuses, blanches, rondes	0	0	0	25	Acremonium strictum Cladosporium cladosporoides Eurotium herbariorum Penicillium chrysogenum Phialophora hoffmannii
D11	Salle 9	59W58 - Boîte	1 cm ²	Non – Empoussièrement léger	0	0	0	24	Aspergillus ochraceus Cladosporium cladosporoides Penicillium chrysogenum Phialophora hoffmannii
D12	Salle 8	2ETP1/136 - Bande de fermeture toilée	1 cm ²	Oui – Duvet brun gris	0	0	0	53	Aspergillus ochraceus Cladosporium cladosporoides Penicillium chrysogenum
D13	Salle 8	2ETP1/136 - Dos de la chemise	1 cm ²	Non	0	1	1	9	Cladosporium cladosporoides Monascus ruber Penicillium chrysogenum
D14	Salle 8	2ETP1/136 - Boîte	1 cm ²	Non - Empoussièrement	0	1	1	8	Cladosporium cladosporoides Monascus ruber Penicillium chrysogenum
D15	Salle 8	Dommages de guerre 1948-1960 - Feuillet intérieur	1 cm ²	Non	0	0	2	18	Absidia corymbifera Fusarium solani Monascus ruber Développement bactérien
D16	Salle 8	Boîte plage 584-Plage 1963 - Feuillet intérieur	1 cm ²	Non - Auréoles	0	3	3	4	Acremonium strictum cladosporium cladosporoides
D17	Salle 8	28W1-28W5 - Feuillet intérieur	1 cm ²	Non	0	0	1	13	Aspergillus penicillioides Phialophora hoffmannii Monascus ruber

V-3 INTERPRETATION ET PRECONISATIONS

V-3-1 Degré général de biocontamination

Trois caractères principaux conduisent à l'évaluation de la gravité d'une biocontamination en milieu intérieur :

1. Déséquilibre entre flore extérieure et flore intérieure.
2. Pauvreté/varieté des espèces identifiées dans l'environnement.
3. Concentration de spores reviviscibles dans l'environnement (surfaces et air ambiant).

La norme française XP X 43-407 de Mars 2006 portant sur la qualité de l'air dans les locaux non industriels définit des catégories de qualité de l'air intérieur en termes de contamination fongique :

Niveau de la contamination	Logement	Autre environnement intérieur (immeubles de bureaux)
Très faible	< 50	≤ 25
Faible	< 200	≤ 100
Moyen	< 1 000	≤ 500
Elevé	< 10 000	< 2 000
Très élevé	> 10 000	> 2 000

Tableau 1 : Description qualitative de la contamination fongique de l'environnement intérieur (contamination exprimée en UFC/m³)¹

Il n'existe pas en France de niveaux d'alerte en termes de contamination microbiologique des surfaces. Cependant deux axes d'évaluation ont été définis par des groupes de recherche :

Concentration	Évaluation qualitative de la contamination
moins de 200 UFC/cm ²	Faible
de 200 à 500 UFC/cm ²	Moyenne
> 500 CFU/cm ²	Forte

Tableau 2 : Evaluation qualitative de la contamination en fonction des concentrations en particules reviviscibles présentes sur surfaces lisses.²

Surface contaminée	Evaluation
< 0,3 m ²	Faible contamination
0,3 m ² - 3 m ²	Contamination moyenne
> 3 m ²	Contamination élevée

Tableau 3 : Evaluation qualitative de la contamination en fonction de la surface de contamination évaluée visuellement.³

En fonction de ces axes d'analyse, la situation fongique des magasins des archives municipales de Boulogne-sur-Mer peut être caractérisée.

¹ : Norme Française XP X 43-407, « Qualité de l'air – Audit de la qualité de l'air dans les locaux non industriels – Bâtiments à usage d'enseignement », AFNOR, Mars 2006, p.14.

² : LIGNES DIRECTRICES POUR L'INSPECTION, L'ÉVALUATION ET L'ÉLIMINATION DES MOISSURES DANS LES LIEUX DE TRAVAIL, Division de la sécurité et de l'hygiène du travail - Travail et Immigration Manitoba, Mars 2001, p.12.

³ : CONTAMINATIONS FONGIQUES EN MILIEUX INTERIEURS - DIAGNOSTIC - EFFETS SUR LA SANTE RESPIRATOIRE -

CONDUITES A TENIR, Conseil Supérieur d'Hygiène Publique De France - Groupe de travail « Moisissures dans l'habitat », Septembre 2006, p.82.

Contamination des surfaces

Le comptage des Unités Formant Colonies (UFC) des échantillons prélevés sur sols, murs et étagères, fig. 29, montre qu'à l'exception du garage, l'ensemble des salles échantillonnées est relativement homogène (cette figure présente les UFC moyennes entre comptages sur milieux PCA et DRBC).

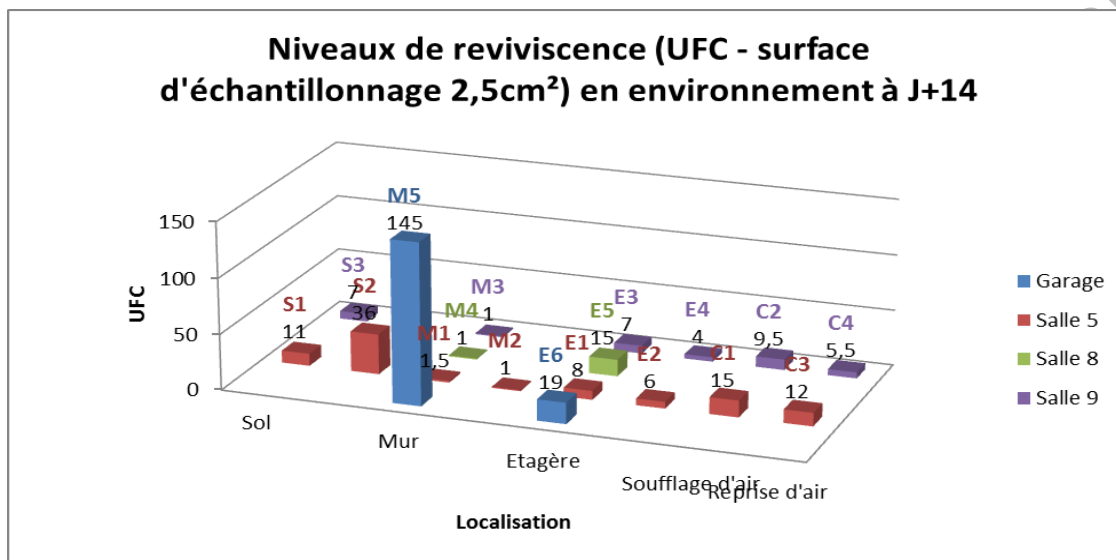


Fig.29 : Comptage des UFC environnement.

Les variations de reviviscence observées pour les prélèvements au sol semblent essentiellement être ponctuelles et résulter de la localisation au sein de chaque salle et de l'exposition à l'environnement (zone ouverte ou protégée, en lieu de passage, de forte consultation et de mouvements de documents...) qui définit des niveaux de sédimentation différents, équivalentes entre les salles 5 et 9 et variant du simple au triple entre deux points de la salle 9 (le point le plus élevé se situant dans la zone la plus mobile du compactus qui pourrait entraîner une chute préférentielle des spores au sol). Dans tous les cas, les concentrations en spores reviviscibles sont très faibles.

L'hypothèse précédente peut être confirmée par la comparaison des reviviscences en étagères, qui présentent peu de variations, entre 4 et 19 UFC, sur l'ensemble des 6 points de prélèvements.

Les reviviscences des échantillons prélevés sur murs sont les plus faibles, les spores ayant statistiquement moins de chances de se fixer à une surface verticale. En revanche le prélèvement sur mur dans le garage constitue, de loin, le point de contamination le plus élevé de cette étude avec une reviviscence 100 fois plus élevée que le reste des échantillons sur murs. Cependant la concentration en UFC/cm² reste en deçà de la limite des 200 UFC/cm² définis précédemment comme la limite supérieure d'une contamination faible.

Etonnement, la concentration en spores reviviscibles sur étagère dans le garage reste dans les normes des autres salles. Ce point sera repris dans la section IV.3. Configurations et causes probables.

Les niveaux d'UFC des échantillons prélevés en conduits d'aération sont très stables entre les deux points de prélèvement et sont de l'ordre des reviviscences relevées sur étagères. De plus les concentrations en particules reviviscibles observées entre soufflage et reprise d'air sont équivalentes, ce qui tend à montrer qu'il n'y a pas dans ces salles d'enrichissement fongique de l'air repris.

Contamination de l'air ambiant

L'utilisation d'un échantillonneur d'air implique l'utilisation d'une table de correction permettant de corriger le comptage réalisé par un facteur statistique d'impaction de plusieurs spores au même endroit. Ce facteur est dépendant de la densité du comptage. Les comptages corrigés donnent l'estimation probable pour chaque échantillon suivante présentée en fig.30.

L'observation des niveaux de reviviscence en air ambiant dans les salles échantillonnées montre un profil très intéressant. En effet si l'air extérieur (qui contient 2032 UFC dans 500L d'air échantillonné) est pris comme référence, l'air intérieur présente une contamination de plus en plus faible avec le déplacement au sein du bâtiment :

L'air prélevé dans le garage (1268 UFC/m³ correspondant à une contamination élevée - <2000 UFC/m³) est 3,2 fois moins contaminé que l'air extérieur.

L'air prélevé dans la salle 5 (142 UFC/m³ correspondant à une contamination moyenne - <500 UFC/m³) est 28,6 fois moins contaminé que l'air extérieur.

L'air prélevé dans la salle 9 (44 UFC/m³ correspondant à une contamination faible - <100 UFC/m³) est 92,4 fois moins contaminé que l'air extérieur.

De la même façon, la comparaison des airs intérieurs entre montre que :

L'air prélevé dans la salle 5 est 8,9 fois moins contaminé que l'air du garage.

L'air prélevé dans la salle 9 est 3,2 fois moins contaminé que l'air de la salle 5.

Or dans le même parcours, les niveaux de reviviscence en conduits de ventilation apparaissent plus stables avec une reviviscence 1,5 plus faible en salle 9 qu'en salle 5.

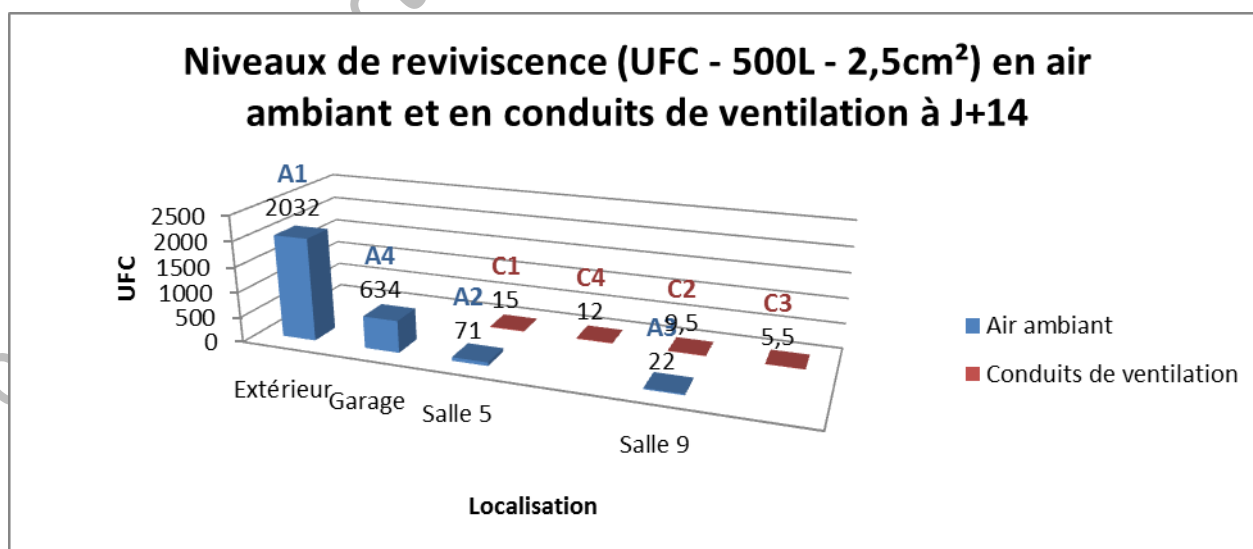


Fig.30 : Niveau de reviviscence air ambiant et conduits de ventilation.

La remarque précédente et la relative homogénéité des contaminations sur étagères dans l'ensemble des salles échantillonnées montrent que le système de ventilation ne peut pas être considéré comme l'agent principal de contamination de l'air ambiant notamment dans le garage.

Contamination des documents

Les niveaux de reviviscence sur documents fig.31 sont à première vue, très variables. Mais plusieurs paramètres doivent être précisés :

Les prélèvements peuvent être réalisés sur surfaces en contact direct avec l'air ambiant (boîtes, reliures, tranches – c'est le cas de D1, D3, D4, D6, D11 et D14) ou relativement isolées (feuillets et conditionnements en boîtes, corps d'ouvrages).

Les surfaces échantillonnées peuvent ou non présenter des développements visuellement identifiables ou des empoussièrtements prononcés.

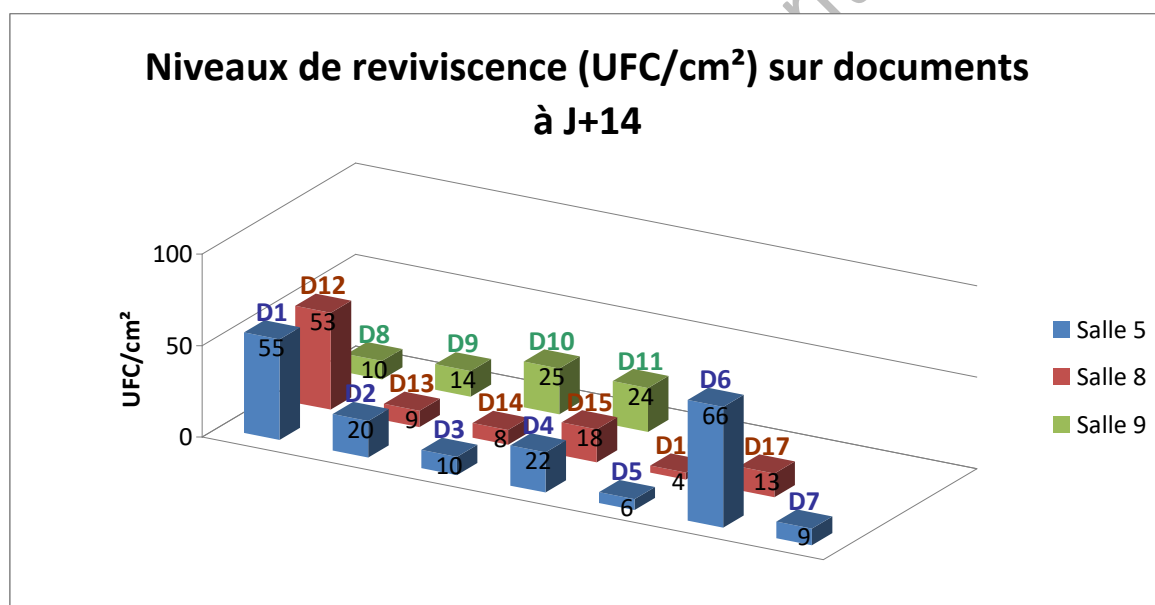


Fig.31 : Niveau de reviviscence des documents

Les prélèvements sur surfaces soumises à l'air ambiant et non contaminées peuvent ici être définies comme témoins, leur charge fongique pouvant être considérée comme le reflet de la contamination par l'environnement. Ce sont les prélèvements réalisés sur boîtes d'archives D4 (salle 5), D14 (salle 8) et D11 (salle 9) dont les niveaux de contamination fongique sont respectivement de 22, 8 et 24 UFC/cm². Ces valeurs correspondent à une faible contamination des surfaces. La faible contamination de l'échantillon D4 peut sans doute être expliquée par les multiples manipulations dont il a été l'objet.

Les documents visuellement contaminés montrent des taux de reviviscences pouvant être regroupés en deux groupes, quelles que soient leur localisation dans les salles et leur exposition à l'environnement :

50 < UFC/cm² < 70 ; c'est le cas de D1, D6 en salle 5 et D12 en salle 8.

UFC/cm² < 50 ; c'est le cas de D3 en salle 5 et D10 en salle 9.

Il est important de noter que pour le dernier groupe, les concentrations en spores reviviscibles relevées sont équivalentes aux plus fortes concentrations relevées en extérieur sur boîte d'archives et définies comme témoins (D4, D11 et D14).

De plus, les plus fortes concentrations observées – premier groupe – ne sont que deux à trois fois plus élevées que celles des témoins.

La fraction reviviscible de la contamination fongique des documents les plus visuellement atteints reste donc faible en regard des normes définies en termes d'hygiène.

Le dernier groupe d'échantillons est très faiblement contaminé. Tous les prélèvements ont été réalisés sur documents protégés par des boîtes ou en corps d'ouvrage. Il est intéressant de remarquer que l'échantillon le plus contaminé (D2 – 20 UFC/cm²) a été prélevé en corps d'ouvrage du classeur D1, présentant de larges zones d'empoussièrement.

Le conditionnement des archives est donc relativement efficace à protéger les documents de la poussière et donc d'une contamination environnementales. Cependant comme le montre l'échantillon D12 il ne peut empêcher le développement d'espèces fongiques présentes à l'intérieur sous l'influence de conditions climatiques favorables.

La charge fongique reviviscible globale des documents est globalement supérieure à la contamination relevée en environnement (sols, murs, étagères). Cette différence peut, pour les documents ne présentant pas de développement visuellement identifiable, s'expliquer par une meilleure conservation des spores.

En conclusion à cette analyse quantitative, on peut estimer que les concentrations en particules reviviscibles sur surfaces lisses (sol, murs et étagères) et sur documents entrent dans la catégorie des contaminations faibles telles que définies dans le tableau 1.

Cependant, les critères pris en compte ne sont applicables qu'aux locaux de travail et les seuils définis en termes de risque sanitaire.

Il convient donc de réajuster les conclusions précédentes en fonction de la destination des lieux : malgré de faibles charges fongiques générales, la présence de zones de développements disséminés dans la quasi-totalité des magasins des archives rend la situation préoccupante pour la bonne conservation des documents et doit être réglée.

Les niveaux de contamination de l'air ambiant sont également préoccupants surtout dans le garage et dans les salles contiguës, et plus généralement au rez-de-chaussée.

V-3-2 Identification et impact des espèces fongiques majoritaires isolées.

L'analyse de la répartition des espèces fongiques identifiées dans les salles fait apparaître des typologies variées.

Pour chaque espèce d'intérêt, seront précisés la fréquence sur documents et en environnement, les valeurs d'activité de l'eau (A_w , fraction d'eau disponible du support) minimales pour la germination et la croissance, ainsi que les éventuels effets pathogènes et effets sur les documents d'archives.

Les espèces les plus fréquemment rencontrées aux points de prélèvement sont en ordre décroissant de fréquence *Cladosporium cladosporioides*, *Phialophora hoffmannii*, *Penicillium chrysogenum*, *Acremonium strictum*, *Monascus ruber*, *Fusarium solani* et *Paecilomyces variotii* ; dont les répartitions sont les suivantes :

NOM		Effet pathogène ^{4, 5}	Effet sur le patrimoine écrit ^{6, 7}
Cladosporium cladosporoides (Aw min = 0.86 – 0.88)	20 points de prélèvement dans toutes les salles : - Sur étagère dans le garage. - Sur 5 documents en salle 5. - Sur 4 documents et 1 étagère en salle 8. - Sur 4 documents, 1 étagère et au sol en salle 9. - En conduits d'aération.	Allergisation.	Colonisation et consolidation sur livres en archives, isolé sur papier, cuirs, parchemins et textiles.
Phialophora hoffmannii (Aw min = 0.85)	14 points de prélèvement. - Sur 2 documents, 2 étagères et 1 sol en salle 5. - Sur 1 document et 1 étagère en salle 8. - Sur 3 documents, 2 étagères en salle 9. - En conduits d'aération, reprise d'air uniquement.	–	Colonisation sur livres en archives, isolé sur papiers et textiles.
P. chrysogenum (Aw min = 0.78 – 0.81)	13 points de prélèvement dans toutes les salles : - Sur étagère dans le garage. - Sur 2 documents, 1 étagère et 1 sol en salle 5. - Sur 3 documents en salle 8. - Sur 3 documents en salle 9. - En conduits d'aération, arrivée d'air uniquement.	Production de mycotoxines.	Agent de dégradation courant en tannerie sur produit fini, isolé sur livres, papiers, parchemins, textiles et colles animales et végétales.
Acremonium strictum (Aw min = 0.78 – 0.80)	9 points de prélèvement. - Sur 1 document, 1 étagère et 1 sol en salle 5. - Sur 1 document en salle 8. - Sur 1 document, étagère et mur en salle 9. - En conduits d'aération, arrivée d'air uniquement.	Allergisation.	Colonisation sur livres en archives, isolé sur papiers, parchemins et textiles.
Monascus ruber (Aw min = 0.93)	8 points de prélèvement. - Sur 3 documents en salle 5. - Sur 4 documents en salle 8.	–	_ Contaminant des sols.

⁴ D'après : CONTAMINATIONS FONGIQUES EN MILIEUX INTERIEURS - DIAGNOSTIC - EFFETS SUR LA SANTE RESPIRATOIRE - CONDUITES A TENIR, Conseil Supérieur d'Hygiène Publique De France - Groupe de travail « Moisissures dans l'habitat », Septembre 2006.

⁵ : MOISSURES UTILES ET NUISIBLES : IMPORTANCE INDUSTRIELLE, BOTTON B., Masson, Paris, 1990.

⁶ : Voir « Fungi isolated from library materials : a review of the literature », Bronislaw Zyska, in: *International Biodeterioration and biodegradation*, Vol.40, N°1, 1997, pp 43-51.

⁷ : Voir « Microbial biodeterioration of leather and its control : a review », Alois Orlita, in: *International Biodeterioration and biodegradation*, Vol.53, 2004, pp 157-163.

	- En conduit d'aération, reprise d'air en salle 5 uniquement.		
<i>Fusarium solani</i> (Aw min = 0.87 – 0.90)	7 points de prélèvement dans toutes les salles : - Sur étagère dans le garage. - Sur 1 document et 1 étagère en salle 5. - Sur 1 document en salle 8. - Sur étagère et sol en salle 9. - En conduits d'aération, arrivée d'air en salle 5 uniquement.	Allergisation. Production de mycotoxines.	Colonisation et consolidation sur livres en archives, isolé sur papiers, parchemins, textiles et colles animales et végétales.
<i>Paecilomyces variotii</i> (Aw min = 0.79 – 0.84)	7 points de prélèvement : - Sur mur dans le garage. - Sur 1 document, un mur et 2 sols en salle 5. - Sur 1 document et étagère en salle 9.	Production de mycotoxines.	Colonisation sur livres en archives, isolé sur papiers, parchemins, textiles et colles animales et végétales.

Cladosporium cladosporoides, *Phialophora hoffmannii* et *Penicillium chrysogenum* sont quasi-omniprésents dans les salles échantillonnées tant sur documents (conditionnés ou non, visuellement contaminés ou non) qu'en environnement.

Cependant, si *Cladosporium cladosporoides* est également présent en conduits d'arrivée et reprise d'air, *Penicillium chrysogenum* n'est isolé qu'en arrivée d'air (de même qu'*Acremonium*

strictum) et *Phialophora hoffmannii* qu'en reprise d'air. Ces observations peuvent indiquer des différences de capacité d'aérosolisation et donc de facilité de diffusion en cas de croissance.

Inversement, *Fusarium solani* est isolé majoritairement en environnement et sur deux documents visuellement sains.

La répartition de *Paecilomyces variotii* est plus déséquilibrée puisqu'il est majoritairement isolé dans le garage et en environnement en salle 5.

La présence de *Monascus ruber*, même sur documents n'est pas problématique, son développement sur documents d'archives n'ayant pas été observé. Il s'agit donc sans doute d'un contaminant environnemental. En revanche, la totalité des autres espèces citées peuvent coloniser les documents d'archives et il est important de noter que leurs Aw minimales de croissance se situent dans une fourchette de 0.78 à 0.86. Ces valeurs correspondent à des humidités relatives à l'équilibre (HRE) de 78 à 86%. Dans cette gamme d'humidité relative, la germination et la croissance des espèces citées sont donc possibles.

Les espèces secondaires isolées sont *Absidia corymbifera* (Aw = 0.788 – 0.89), *Aspergillus ochraceus* et *penicillioides* (Aw = 0.77 – 0.85), *Mucor Plumbeus* (Aw = 0.93), *Penicillium*

corylophilum et brevicompactum ($A_w = 0.78 - 0.82$), Scopulariopsis brevicaulis ; tous susceptibles de coloniser les documents d'archives.

Les effets pathogènes listés dans le tableau précédent ne sont présentés qu'à fin d'information sur la santé des espèces fongiques isolées dans les magasins des archives de Boulogne.

Les réactions allergiques induites sont essentiellement de type atteintes bronchiques (toux) et asthme. Les cas de rhinite sont controversés. Il faut noter que le caractère allergène des moisissures est plus important chez les personnes souffrant déjà d'asthme (pour lesquels la fréquence de la sensibilisation augmente avec la sévérité de l'asthme) et que la sévérité de la réaction n'est pas exclusivement dépendante de la dose d'exposition.

Quant à l'effet toxique des moisissures il est essentiellement le fait de l'ingestion. Un effet par voie respiratoire chez l'homme reste débattu même s'il a été démontré expérimentalement chez l'animal.

En aucun cas LARCROA ne peut se prononcer sur le caractère préoccupant ou non de la situation microbiologique des magasins des archives municipales de Boulogne-sur-Mer en termes de santé publique.

En revanche, à l'exception de Monascus ruber, la totalité des espèces identifiées en environnement sont susceptibles de coloniser et de se développer sur les matériaux d'archives.

VI CONCLUSION

L'étude a souligné la subordination du climat de l'ensemble des salles au climat extérieur. Comme nous n'avons pas d'enregistrements de l'humidité et de la température avant l'installation de VMC double flux nous n'avons pas d'élément de référence pouvant mettre en cause cet équipement. Néanmoins nous pouvons supposer qu'il n'a pas réglé les problèmes climatiques des archives.

Le mur (nord) commun aux salles 5 et 6 est fortement imprégné d'eau. Ce mur semble s'appuyer directement sur un remblai. Les eaux de précipitation ne doivent pas être évacuées correctement et pénètrent par capillarité dans ce mur et la protection intérieure est insuffisante pour arrêter les infiltrations d'eau.

La salle appelée « garage » qui sert de zone de débarquement d'archives s'ouvre sur la rue Bertinghen par une large porte sectionnelle. Qu'elle soit ouverte ou fermée elle est un lieu d'échange des flux d'air d'extérieur vers l'intérieur et inversement, avec toutes conséquences collatérales que cela comporte. L'étude a montré par ailleurs qu'une forte concentration de charges fongiques stagne d'abord dans cette pièce pour aller ensuite contaminer les salles d'archives les plus proches.

La situation fongique des archives municipales de Boulogne-sur-Mer ne pourra être réglée sans régulation des conditions climatiques intérieures. A défaut, les variations du climat extérieur continueront à se répercuter dans le bâtiment par l'intermédiaire du système de ventilation. A chaque période de forte humidité correspondra une augmentation de l'humidité relative intérieure qui si, elle atteint 70% entrera dans la zone de germination et de croissance de certaines moisissures ayant pour effet l'apparition ponctuelle de nouvelles colonies.

Par conséquent les conditions de conservation des documents graphiques doivent être ramenées aux valeurs de $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $55\% \pm 5\%$ d'humidité relative. Il n'est pas suffisant de réguler l'hygrométrie. Toute variation de température entraîne, en retour, une variation d'humidité relative de l'air.

Les résultats de la présente étude confirment la perception qu'induit la répartition visuelle des développements fongiques même si celle-ci n'a pas fait l'objet d'une campagne de cartographie.

Les niveaux de biocontamination en environnement, dans les salles échantillonnées sont faibles en termes de charges fongiques et se révèlent relativement uniformes dans les salles 5, 8 et 9. Seule exception, le « garage » apparaît plus fortement contaminé.

Les charges fongiques de l'air intérieur sont très variables en fonction de la localisation des salles. Un gradient de concentration apparaît dont l'origine semble se trouver au niveau du « garage ». Or les niveaux de sédimentation en conduits d'aération – soufflage et reprise – ne permettent pas d'imputer ces différences de composition de l'air intérieur au seul système de ventilation. La proximité du « garage » avec l'air d'embarquement paraît participer à la contamination de l'air intérieur par l'extérieur.

La comparaison des niveaux de contamination de l'air et des surfaces d'une part et des documents contaminés et non contaminés d'autre part montre qu'au moment de l'échantillonnage les espèces fongiques présentes ne sont pas en phase de croissance active. Cette observation est confirmée par les relevés d'humidité relative en boîtes d'archives, réalisés au moment du prélèvement, montrant une HR en boîte inférieure à 60% dans les salles échantillonnées.

Sur la base de ces résultats, la contamination fongique observée sur les documents des archives municipales de Boulogne-sur-Mer peut être attribuée à des conditions climatiques intérieures inadaptée à la bonne conservation des documents graphiques.

Des pics d'humidité relative dans la zone de germination et de croissance des moisissures identifiées (78% HR) est donc la source des développements fongiques observés. Heureusement, la dépendance du milieu intérieur aux fluctuations extérieures importantes et rapides a limité la dispersion des moisissures et évité une contamination généralisée. Ce qui explique que les colonies fongiques, visuellement identifiables, se sont limitées aux matériaux textiles, plus favorables à leur développement (hygroscopicité, substrat plus adaptés).

L'étude climatique met également en lumière que la mise en boîte d'archives des documents, si elle protège des dépôts de poussières et donc de spores fongiques et lisse les variations climatiques, induit un retard à la désorption d'humidité qui peut poser problème en cas de période prolongée de forte humidité relative. Cette éventualité ne peut pas être négligée dans la situation des archives municipales de Boulogne-sur-Mer.

VII- PRECONISATIONS ET RECOMMANDATIONS

Les recommandations et les préconisations sont classées par ordre de priorité en trois groupes – Bâtiment – Equipement climatique – Assainissement microbiologique.

VII-I Bâtiment

L'audit visuel du bâti a révélé des problèmes d'étanchéité dus à des infiltrations capillaires et un manque d'isolation. Nous recommandons :

- Assainissement du mur (nord) salle 5 et 6 en pratiquant à l'extérieur un drain d'évacuation des eaux.
- Isolation du « garage » par un système de portes hermétiques, pour contenir au mieux la contamination venant de l'extérieur.

VII-2 Equipements climatiques

Pour obtenir un air de la qualité exigée pour la conservation d'archives, il faudrait équipé le bâtiment d'une centrale climatique et faire des aménagements spécifiques dans les salles. Ces équipements et travaux sont coûteux et dans le contexte actuel, notre objectif est de chercher des solutions simples de manière limiter l'impact du climat sur le fond de documents. A cet égard nous proposons :

- Installation dans chaque salle d'un ou plusieurs enregistreurs d'humidité et de température permettant d'enregistrer et de suivre dans le temps l'évolution du climat. Des systèmes sondes radio reliant les enregistreurs à une station PC améliore le confort du contrôle.

Si la VMC double flux est bien générateur de l'instabilité climatique dans les salles il serait intéressant après avoir fait les travaux d'assainissement et d'isolation dans le bâtiment de mener plusieurs actions de manière à trouver la solution la plus fiable.

- Arrêter la VMC, contrôler l'évolution du climat sur plusieurs mois et faire un bilan climatique.
- Utiliser la VMC et installer dans plusieurs salles des déshumidificateurs, contrôler l'évolution du climat sur plusieurs mois et faire un bilan climatique.

VII-3 Assainissement microbiologique

Les charges fongiques relevées dans l'air et dans le garage sont problématiques. Le contrôle du climat doit obligatoirement s'accompagner.

- D'une maintenance régulière et fiable du système de ventilation (notamment par le nettoyage des caisses de ventilation et par un changement régulier des filtres qui peuvent être, à saturation une source importante de contamination).
- D'une isolation correcte des salles d'archives de l'entrée d'air par les voies d'accès, notamment au niveau de l'aire de débarquement.

Sur la base des résultats de la présente étude et étant donnés les faibles niveaux de développements sur documents, aucune campagne de désinfection n'est préconisée.

Le traitement des archives contaminées peut être réalisé :

- par dépoussiérage précautionneux et nettoyage des surfaces. Cette solution, légère, permet la stabilisation de la situation et une réduction concentrations en spores sur document et en environnement. Elle constitue un compromis qui nous semble intéressant dans le cas des archives municipales de Boulogne-sur-Mer en raison des faibles charges fongiques relevées, de la configuration non continue de la contamination fongique visuellement identifiée et de la superficie totale des magasins. Cependant, elle ne permettra qu'une diminution de la charge fongique observée. Toute démarche curative restera sans effet sans régulation climatique.
- Le dépoussiérage pourra être mené uniquement sur les documents contaminés. Si la totalité des archives sont dépoussiérée, le traitement devra être d'abord mené sur les documents contaminés. Il sera réalisé avec un aspirateur à filtre absolu en suivant les mêmes recommandations que le dépoussiérage des livres non moisissus. Afin de terminer plus finement le dépoussiérage, les opérateurs peuvent utiliser des peaux de chamois non pelucheuses ou des chiffons microfibre doux sans imprégnation de produit de nettoyage.
- Les documents devront être traités individuellement et le dépoussiérage concernera tout l'ouvrage : les faces extérieures : tranches, dos et plats et le corps d'ouvrage si nécessaire (si la contamination s'est développée à l'intérieur du corps d'ouvrage).
- L'aspirateur devra être muni d'un variateur de puissance entre 20 et 1300 W avec une pression maximum de 2286 bar, de filtres correspondant à la norme HEPA (High efficiency particulate air filter), d'embouts adaptés (brosses à poils doux sans parties métalliques). Le matériel sera nettoyé chaque jour à l'alcool à 70% et séché avant emploi. Les filtres seront changés au minimum une fois par semaine (A voir avec les préconisations du fournisseur).
- Les documents seront dépoussiérés dans une salle ayant une extraction d'air mécanique pour permettre une meilleure évacuation des poussières et des moisissures.
- Par ailleurs le personnel devra être muni de protections individuelles : gants masques, blouse.
- Il est préférable de changer, après dépoussiérage, toutes les chemises dont les sangles sont visuellement contaminées.
- Il nous semble intéressant de préconiser le nettoyage du garage, plus fortement contaminé que les autres salles. Il devra avoir lieu une fois vidé. Le nettoyage d'une travée devra débuter par les tablettes les plus hautes pour finir avec les tablettes les plus basses. Les tablettes pourront être lavées avec une solution alcoolique à 70% et les sols avec un produit approprié à sa nature.
- A long terme, les dépôts de poussières constituent un substrat propice à la colonisation et au développement fongique. De la même façon que les sols sont régulièrement nettoyés, les documents doivent être régulièrement dépoussiérés et surveillés.
- L'établissement d'un plan de veille est essentiel à la mise en place de mesures rapides et adaptées en cas d'identification d'une nouvelle phase de développement.

Pour LARCROA

Alain Roche : Ingénieur et gérant.
Sébastien Gilot : Biologiste

Toute reproduction de ce document est interdite