

**« Conservation d'échantillons de mousse de sièges d'un ancien
avion Caravelle 12 et propositions de matériaux/dispositifs de
remplacement »**

Mémoire présenté par : Baptiste Prétôt

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation

Objets scientifiques et techniques

2014-2015

Remise du travail : 20.07.2015

Jury: 24-25.08.2015

Nombre de pages : 110

« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »

Date et signature :

Remerciements

Arrivé au terme de ce travail, je tiens à remercier :

Le collège d'enseignants de la HEAR-ARC, composé de M. Régis Bertholon, mon professeur référent, M. Thierry Jacot, M. Thobias Schenkel et M. Valentin Boissonnas pour leur disponibilité et leur aide continuelle ;

M. Laurent Rabier, conservateur responsable de la collection d'aéronefs du Musée de l'Air et de l'Espace du Bourget ainsi qu'à toute son équipe chargée des collections pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un objet aussi symbolique du patrimoine de l'aviation française voire mondiale : la Caravelle 12 ;

M. Christian Binet, chargé d'enseignement à la HEAR C-R et à l'INP, pour avoir proposé le sujet et pour avoir été très disponible tout au long de mon travail ;

Mme Laura Brambilla, adjointe scientifique à la RA&D, pour les analyses FTIR réalisées et pour les nombreux éclaircissements et informations donnés sur le sujet ainsi que M. Joël Gueniat, directeur et administrateur chez ©LabTox SA, pour avoir mis à ma disposition non seulement ses qualités de chimiste confirmé mais également son laboratoire, pour réaliser les micro-tests chimiques et autres observations et analyses MEB-EDS et ceci gratuitement ;

Mme Mijanou Gold, conservatrice-restauratrice à la Collection d'Art Brut de Lausanne, pour m'avoir fait part de ses connaissances sur la problématique de la mousse polyuréthane et pour avoir répondu à mes nombreuses questions avec beaucoup d'intérêt et de patience. Mme Sylvie Ramel, conservatrice-restauratrice spécialiste des matériaux modernes, pour sa contribution dans la recherche des pistes de réflexion quant aux méthodes de conservation ;

Mme Valentine Brodard, assistante d'enseignement à la HEAR C-R, pour son aide précieuse tout au long de ce travail de Bachelor ; M. Alexis Domjan, chargé d'enseignement à la HEAR C-R, pour m'avoir fait part de ses nombreuses connaissances sur les polymères de synthèses et M. Gilles Hoffmann, collaborateur administratif à la HEAR C-R, pour son aide précieuse quant aux commandes de matériel pour la réalisation de mes tests ;

Mme Françoise Seghairia, professeure chargée d'enseignement à la HES-Soins infirmiers, Mme Stephanie Negri, ingénieure de sécurité à la SUVA et M. Patrick Gerber, hygiéniste et inspecteur du travail du canton de Neuchâtel pour leurs connaissances dans les domaines sanitaires et sécuritaires ;

Les différents fournisseurs, garagistes et artisans qui ont pris le temps de me répondre et de me faire part de leur riche expérience ;

Je terminerai par remercier celles et ceux qui n'ont cessé d'être présents pour moi, non seulement durant la réalisation de ce travail mais également durant ces trois années de Bachelor, à savoir tous les membres de ma volée 2012-2013 pour leur gentillesse et leur dévouement indestructibles, tous les enseignants de la HEArc C-R, pour les trois années passées à leurs côtés ; mes parents et en particulier mon père M. Bernard Prétôt pour son soutien à toute épreuve et bien évidemment à mon amie Géraldine Safjan, qui n'a cessé de m'épauler et de m'encourager dans mes choix d'études.

A tous un très GRAND MERCI !

Sommaire

Résumé	3
Abstract.....	3
Introduction.....	5
1. Présentation du Musée et de ses collections	6
1.1 Projet Scientifique et Culturel (PSC)	7
1.2 Réflexion autour de la légitimation d'un traitement de conservation-restauration du rembourrage des sièges.....	8
1.3 Description de l'avion.....	11
1.4 Description de la cabine et des sièges.....	12
1.4.1 Cabine.....	12
1.4.2 Sièges.....	14
1.5 Description de la mousse de rembourrage.....	17
2. Documentation relative au matériau	22
2.1 Echantillonnage	22
2.2 Techniques d'identification de la mousse.....	23
2.2.1 Examen comparatif avec la documentation existante.....	24
2.2.2 Tests microchimiques	28
2.2.3 Observation sous microscope optique.....	31
2.2.4 Observation sous MEB et microanalyse par EDS.....	31
2.2.5 Analyse FTIR.....	32
2.3 La mousse de polyuréthane.....	33
2.3.1 Contexte de création (historique, économique,...).....	34
2.3.2 Domaines d'application.....	34
2.3.3 Synthèse du polymère	35
2.3.4 Technologie de mise en œuvre.....	38
2.3.5 Facteurs de dégradation et effets sur les propriétés du matériau.....	40
3. Technique de retrait de la mousse endommagée	44

3.1 Mesures sécuritaires et sanitaires	44
3.2 Limites des recommandations sécuritaires et sanitaires	47
3.3 Protocole de retrait des mousses	48
4. Propositions de méthodes de conservation à long terme.....	52
4.1 Méthode 1 : Mise en anoxie	54
4.2. Méthode 2 : Technique de surgélation	57
4.3 Méthode 3 : Boîte en carton de qualité conservation avec sorbants	59
4.4 Méthode 4 : Boîte en polypropylène de type Rako® avec sorbants.....	62
4.5 Méthodes de conservations dites basiques	64
4.5.1 Méthodes 5 : Sachet Minigrip® avec écran en aluminium	64
4.5.2 Méthode 6 : Pochette en Tyvek®	65
4.5.3 Méthode 7 : Papier de soie.....	66
5. Matériaux/dispositifs de remplacement.....	69
5.1 Matériaux proposés	73
5.1.1. Mousse PE Ethafoam® 4101.....	73
5.1.2 Mousse PE Plastazote® haute densité.....	75
5.1.3 Mousse PUR (28kg/m ³).....	78
5.1.4 Mousse PUR haute résilience (HR).....	79
5.2 Autres méthodes	83
5.2.1 Remplacement partiel.....	84
5.2.2 Consolidation	84
5.2.3 Non intervention directe sur l'objet.....	85
5.2.4 Traitement hybride du rembourrage des sièges.....	86
5.3 Recommandations générales après traitement.....	87
Discussion	89
Conclusion.....	91
Bibliographie.....	94
Crédits photographiques.....	106
Table des illustrations.....	106
Glossaire	109

Résumé

Ce travail de mémoire porte sur les sièges d'un ancien avion Caravelle datant du début des années 80, conservé au musée de l'Air et de l'Espace de Paris, dont la mousse de rembourrage présente une dégradation importante, ce qui entrave sa présentation au public. La problématique abordée comprend trois objectifs principaux à savoir : proposer des méthodes de conservation à long terme d'échantillons de la mousse de rembourrage des sièges ; proposer des matériaux ou dispositifs de remplacement ainsi qu'établir un protocole de retrait de la mousse endommagée.

Le travail a ainsi débuté par un constat d'état de la cabine et des sièges réalisé *in situ*, ayant permis de mettre en avant les différents types de sièges parmi les 140 existants ainsi que leurs mousses de rembourrage constitutives. A la suite de ces observations un protocole de retrait spécifique pour chacune des configurations de sièges retrouvées a été établi et expérimenté.

Sur la base d'une campagne d'identification ayant permis de confirmer qu'il s'agissait de mousses de polyuréthane de type éther et d'une étude spécifique des processus et facteurs de dégradations du matériau, sept méthodes de conservation à long terme ont pu être développées et mises en œuvre. L'efficacité de ces dernières, présentant différents niveaux de complexités, ne pouvant être jugée uniquement sur les deux mois du travail de Bachelor, une fiche de suivi des échantillons testés a été spécialement établie à cet effet.

Par ailleurs, les recherches inhérentes à un dispositif ou à un matériau de substitution au rembourrage actuel des sièges ont conduit à la proposition de quatre types de mousses adaptées aux différentes fonctions que les sièges pourraient être amenés à remplir dans le futur (soit une restitution fonctionnelle, muséographique et même sensitive). Deux types sont des mousses polyéthylène (PE) tandis que les deux autres sont des mousses polyuréthane. Les recherches ont également débouché sur la proposition d'alternatives au remplacement complet du rembourrage d'origine.

Enfin, des recommandations d'après traitement ont également été proposées à la suite de la mise en application des méthodes de conservation à long terme et du remplacement de la mousse actuelle.

Abstract

This thesis is about the seats of an old airplane Caravel dating from the early 1980's, stored at the Air and Space Museum in Le Bourget, Paris, and which the damaged foam is likely to impede its presentation to the public. The current issue discussed here consist of three major goals, which are: propose long-term preservation techniques of the seat foam samples; propose materials or replacement devices, along with establishing a protocol of damaged foam withdrawal.

This work started with a report of the cabin state and the seats carried out *in situ*, which allowed bringing out the different types of seats among the 140 existing, along with their constituting foams. Following these observations, a protocol of withdrawal specific to each seat configuration found was established and experimented.

Based on an identification campaign, which allowed confirming they were ether-type polyurethane foams and on a specific study of the processes and damage factors of the material, seven long-term preservation techniques could be developed and implemented. The efficiency of those techniques, which present different levels of complexity and thus could not be evaluated only based on the two months of bachelor work, a record card of the samples tested was specifically established.

Furthermore, the investigations regarding a device or a substitution material of the current seat stuffing have led to the proposition of four types of foam adapted to different functions that the seats could be required to fulfill in the future (i.e., a functional, museographic, and even sensitive restoration). Two of them are polyethylene foams, while the other two are polyurethane ones. The investigations have also led to the proposition of alternatives to the full replacement of the original stuffing.

Finally, some after-treatment recommendations have also been proposed following the implement of the long-term preservation techniques and of the replacement of the existing foam.

Introduction

La problématique abordée dans ce travail se porte sur les sièges d'un ancien avion Caravelle datant du début des années 80, conservé au musée de l'Air et de l'Espace de Paris, dont le rembourrage, supposé être de la mousse polyuréthane (PUR), présente une dégradation importante, ce qui entrave sa présentation au public.

La problématique de la conservation-restauration des polymères*¹ de synthèse soulève aujourd'hui plus que jamais de nombreux questionnements et enjeux dans le domaine de la conservation-restauration d'objets du patrimoine. Dès le début du 20^{ème} siècle, les matières « plastiques* » connaissent un important développement et investissent progressivement les différents secteurs de production industriels. Ce matériau étant préféré aux substances naturelles pour son coût très avantageux et sa grande polyvalence. Longtemps connus comme étant des matériaux très résistants sous tous points de vue, les polymères de synthèse sont aujourd'hui une source d'inquiétudes pour les Institution muséales, du fait de leur instabilité particulièrement marquée aux différents facteurs environnementaux. Malgré une connaissance toujours plus précise des différents polymères de synthèse existants, notamment sur le PE, le caoutchouc et le PVC et des études menées sur le sujet, les solutions pour enrayer les phénomènes de dégradation et les traitements de restauration spécifiques restent limités ou alors on ne dispose encore que trop peu de recul pour juger de leur viabilité et de leur efficacité sur le long terme². La composition au sein d'un même type de polymère de synthèse pouvant fortement varier d'un fabricant à l'autre et leur identification n'étant pas toujours évidente tant les couleurs et les formes prises par les différentes catégories de polymères sont variées, l'anticipation de leur comportement et de leurs dégradations associés est donc rendue particulièrement complexe. L'ensemble des problèmes posés par la prise en charge de ce type de collection compromet ainsi la préservation de tout un pan du patrimoine contemporain. Par ailleurs, la mousse de polyuréthane est l'un des matériaux les plus répandus parmi les polymères de synthèse, notamment dans les musées de sciences et techniques où il constitue la plupart des rembourrages des sièges de véhicules datant d'après la 2^{ème} Guerre mondiale. Il est également un des plus problématiques à prendre en charge³. La question essentielle qui se pose est : quelles solutions adéquates proposer pour sa conservation à long terme⁴ et quels traitements de restauration, respectueux des valeurs de l'objet associé peuvent être envisagés ?

Dans cette optique, le travail comprend trois objectifs principaux en adéquation avec le musée à savoir : proposer des méthodes de conservation à long terme d'échantillons de la mousse d'origine ;

¹ La définition des termes suivis d'une étoile (*) est à consulter dans le glossaire en p.109

² Morgan, 1993, p.50

³ Avec le nitrate et l'acétate de cellulose et le PVC. 20, P.205-2010

⁴ Les méthodes de conservation d'un objet ou matériau vise avant tout à préserver l'intégrité de ce dernier mais également les autres bien se trouvant à proximité.

proposer des matériaux ou dispositifs de remplacement et en amont, soumettre une technique permettant d'avoir accès à la mousse en vue de son examen et retrait.

Méthodologie et résultats attendus

Pour débiter ce travail il sera nécessaire de savoir comment procéder pour avoir accès à la mousse. Dès lors l'établissement de protocoles de retrait du rembourrage devra être réalisé en amont et sur la base d'un examen approfondi des différents types de sièges présents dans la cabine et de leurs spécificités. L'avis de spécialistes des questions sanitaires et sécuritaires inhérentes à l'action sera également indispensable. Pour proposer des méthodes de conservation adaptées sur le long terme il sera essentiel de connaître la nature du matériau en présence et sa sensibilité spécifique. Une campagne d'identification visant à confirmer la nature des mousses ainsi qu'une étude approfondie de ses processus et facteurs de dégradation seront nécessaires. Les propositions devront également s'appuyer sur les méthodes déjà connues sur le sujet et sur les principes et recommandations de conservation spécifiques au matériau ou aux polymères de synthèses en général. Concernant la proposition de matériaux ou dispositifs de substitution, il faudra aussi préciser la fonction que ce dernier devra remplir. En connaissance de cause, les choix devront s'appuyer sur les matériaux recommandés dans le domaine de la conservation-restauration mais également sur le regard de spécialistes du domaine. L'avis de fournisseurs spécialisés et d'artisans en charge de la réfection de sièges automobiles, par exemple, sera également intéressant.

Ainsi, le travail devra fournir à la fois des protocoles de retrait du rembourrage actuel des sièges ; donner la nature exacte du rembourrage d'origine et les outils permettant son identification ; proposer plusieurs méthodes de conservation à long terme d'échantillons du matériau (suivant plusieurs niveaux de complexité) ; une procédure de mise en œuvre spécifique ainsi qu'une fiche de suivi permettant de juger de leur efficacité sur le long terme ; proposer des matériaux ou des dispositifs de substitution adaptés aux différentes fonctions que les sièges pourraient être amenés à remplir ainsi que des alternatives au remplacement complet des mousses d'origine. Enfin, une liste de recommandations d'après traitement devra être réalisée afin de garantir la pérennité des traitements proposés.

1. Présentation du Musée et de ses collections

Le Musée de l'Air et de l'Espace est l'un des plus anciens musées aéronautiques au monde⁵. Ses collections sont aussi nombreuses que variées : plus de 300 avions, des premiers appareils volants, comme le planeur Chanute de 1904 ou encore l'avion Vuia de 1906 (des pièces uniques !), aux modèles Concorde dont il est le seul à détenir deux exemplaires, en passant par des avions de chasse de la première Guerre mondiale (dont un Fokker D.VII et un Spad XIII, considérés par le Musée

⁵ Musée de l'Air et de l'Espace, 2011 [en ligne]

comme les pièces maîtresses de la collection)⁶ ; des objets du domaine spatial, avec notamment des reproductions à l'échelle 1:1 de la fusée Ariane (1 et 5) ; un planétarium, reproduisant les diverses constellations sans oublier un grand nombre d'objets sur les « ballons » du 18-19^{ème} siècle, notamment des œuvres graphiques⁷. L'Institution dispose également d'un grand centre d'archives, regroupant la documentation historico-technique relative aux collections. Comme le cite Catherine Maunoury : « *Le site du Bourget présente l'avantage d'une très forte cohérence avec le patrimoine aéronautique, puisqu'il en a lui-même écrits certaines des pages les plus fameuses*⁸ ». Etant donné que l'Industrie de l'aéronautique est intimement liée à la Guerre et que la France est le territoire où se sont déroulés l'essentiel des deux conflits mondiaux (la 1^{ère} et la 2^{ème} Guerre mondiale). Avec l'arrivée d'appareils provenant d'autres pays, les collections ont assez rapidement pris de l'ampleur, dépassant ainsi le « simple » noyau du patrimoine aéronautique industriel français.

Le musée est réparti sur deux sites : le premier à l'emplacement de l'ancienne aérogare (superficie de 125'000 m², conçue en 1937 par le célèbre architecte français Jacques Labro) sur laquelle se tiennent les espaces d'expositions et le site de Dugny, une ancienne base de l'Armée de l'Air (130'000 m²), abritant aujourd'hui les réserves d'une partie des collections d'aéronefs et les ateliers de conservation-restauration. Le Musée de l'Air et de l'Espace est une Institution d'Etat, qui dépend du Ministère de la Défense et de la DMPA (Direction de la mémoire du patrimoine et des archives)⁹.

L'historique du musée est à consulter en *annexe 1, p.3*.



Figure 1 Entrée principale du Musée de l'Air et de l'Espace de Paris.

1.1 Projet Scientifique et Culturel (PSC)

Général

Le musée de l'Air et de l'Espace compte deux missions prioritaires. La première est *d'assurer la conservation et l'enrichissement des collections de l'Etat, ainsi que la présentation au public du patrimoine historique et culturel dans le domaine de l'aéronautique et de l'espace* et la seconde est de *conserver la mémoire du site du Bourget*. Par ailleurs, le musée est également responsable de la valorisation de l'aérogare, classé aujourd'hui comme monument historique. Ainsi c'est près d'une centaine de personnes qui travaillent chaque jour au sein de l'institution, dans ses divers secteurs

⁶ Maunoury, 2012, p.1 *non publié*

⁷ Parisinfos, 2010 [en ligne]

⁸ Maunoury, 2012, p.3

⁹ Musée de l'Air et de l'Espace, 2010 [en ligne]

d'activités que sont la conservation et la restauration des collections, l'animation, l'accueil du public, la sécurité, la promotion ou encore l'administration du musée¹⁰.

Il est important de considérer le caractère généraliste du musée qui se doit de prendre en considération l'ensemble du secteur aéronautique, que cela relève de l'aviation civile et militaire, française ou étrangère¹¹.

PSC de la Caravelle 12

Historiquement, la politique du musée était d'ouvrir au maximum ses collections pour les visiteurs et plus particulièrement les avions de lignes¹² dont les cabines étaient facilement accessibles¹³. Cela correspondait à une époque où les objets techniques n'étaient pas encore réellement considérés comme des biens patrimoniaux. Aujourd'hui, cette vision s'est quelque peu modifiée, puisque l'institution souhaite désormais axer sa politique sur la conservation, à long terme, de ses collections. Cette logique conduit donc le musée à réduire de plus en plus l'accès au public. Or, les collections d'aéronefs sont particulièrement sollicitées pour des tournages télévisés et la Caravelle 12 n'échappe pas à cette règle. En effet, une certaine pression est exercée par les services commerciaux du musée qui souhaitent louer l'appareil pour des reconstitutions cinématographiques, des enjeux financiers entrant en considération. Malgré une certaine volonté de restreindre l'accès aux cabines, le conservateur du musée n'exclut de loin pas la possibilité que la Caravelle 12 soit, dans un avenir proche, rouverte au public. Plusieurs perspectives se profilent donc pour cet avion, même si le musée ne s'est pas encore positionné clairement. Pour l'heure ce dernier souhaite disposer de plusieurs pistes de réflexions s'agissant de la remise en état de la cabine de la Caravelle (restitution technique et muséographique) et dont les sièges sont l'élément central. Les propositions devraient prendre en compte à la fois une conservation à long terme des sièges et des valeurs culturelles qui lui sont associées et en même temps, une éventuelle mise à disposition du public ou encore une utilisation pour des tournages vidéos. Dans une optique plus large, le travail à fournir devrait également permettre au Musée de disposer d'une base de travail permettant de se positionner sur différentes propositions par rapport à la conservation du bien et pour d'autres travaux de conservation-restauration se portant sur la réfection de sièges d'autres types d'avions, présentant des dommages similaires.

1.2 Réflexion autour de la légitimation d'un traitement de conservation-restauration du rembourrage des sièges

Toute intervention de conservation-restauration nécessite au préalable une réflexion globale sur les impacts positifs ou négatifs qu'une telle intervention peut engendrer sur l'objet et ses valeurs

¹⁰ Musée de l'Air et de l'Espace, 2010 [en ligne]

¹¹ Musée de l'Air et de l'Espace, 2010 [en ligne]

¹² A l'image du Concorde laissé en libre accès au public dans le cadre de l'exposition permanente.

¹³ Rabier, 2015, *entretien oral*

culturelles¹⁴. Bien qu'il s'agisse de traiter uniquement les sièges, ces derniers font partie d'un tout, soit de la cabine et plus largement de l'avion. Autrement dit, le traitement des sièges n'aura pas uniquement des répercussions pour eux-mêmes mais pour l'avion en général. Bien qu'ils soient tous des objets à part entière, il faut considérer le cas de la Caravelle 12, au même titre qu'un autre bien culturel d'une taille réduite, dont certaines de ses parties constitutives présentent des altérations mettant en péril son intégrité matérielle et immatérielle. Le traitement des sièges s'inscrit donc dans un projet de conservation-restauration plus large, visant à faire retrouver à la cabine et à l'avion¹⁵, un état de conservation adapté aux différentes fonctions qu'ils pourraient être amenés à remplir.

On peut tout d'abord attribuer à l'avion une valeur de recherche historique¹⁶, s'inscrivant comme à un stade particulier de la création du domaine aéronautique. En effet, l'appareil dont il est question fait partie de la célèbre gamme d'avions français Caravelle, connue pour ses nombreuses innovations, notamment au niveau de ses réacteurs. Les Caravelles sont les premiers avions de transport à réaction français et les premiers jets moyen-courriers à être utilisés sur des lignes européennes¹⁷. Les avions Caravelle sont des témoins et des acteurs de l'essor de l'aviation française de l'après-guerre. Par ailleurs, l'aménagement de la cabine présente une réelle valeur artistique. En effet, bien que le choix des matériaux et des autres éléments utilisés se porte avant tout sur des critères et des exigences de performance (légèreté, résistance,...) et économiques, la couleur des housses des sièges et des rideaux, comme la moquette à motifs stylisés, typique des années 70-80 ou encore les cloisons en faux plaqué bois, sont autant d'éléments qui témoignent d'une réelle touche artistique de la part de leurs concepteurs. Les sièges eux, par leur silhouette simple, épurée et uniformisée, symbolisent bien l'essor du secteur industriel et des productions en série du 20^{ème} siècle au même titre que d'autres domaines techniques. Ils ont su bénéficier du fonctionnalisme (courant du milieu du 20^{ème}) où le mobilier est réduit à l'essentiel, misant sur sa fonctionnalité et son confort¹⁸. Or vu l'état de dégradation de la cabine et notamment des sièges, ce dernier porte atteinte aux valeurs précitées et ne contribue ni à la mise en valeur, ni à la conservation de l'avion et de ses éléments constitutifs, qui en font pourtant sa richesse.

¹⁴ May, 2009 [en ligne]

¹⁵ Pour exemple, un nettoyage du fuselage a déjà été partiellement opéré par une société de nettoyage spécialisée.

¹⁶ Les valeurs culturelles citées dans ce chapitre s'appuient sur celles proposées par Alois Riegl (1903) et Barbara Applebaum (2007). Bertholon, 2012 *non publié*

¹⁷ Facon, 2010, p.132

¹⁸ Gold, 2004, p. 7-10

Par ailleurs, l'état de dégradation des sièges a également compromis deux des valeurs fondamentales de l'objet, soit les valeurs esthétiques et d'usage¹⁹. Les sièges ne sont plus fonctionnels tant d'un point de vue mécanique, sanitaire ou sécuritaire, notamment par les particules et les odeurs qu'ils rejettent. Un traitement de conservation-restauration du rembourrage des sièges (par remplacement ou consolidation) pourraient permettre à ces derniers de retrouver leur fonction première et plus globalement de gagner en lisibilité. En améliorant l'esthétique de la cabine c'est l'ensemble de l'avion qui serait ainsi revalorisé pour la plus grande satisfaction des visiteurs. Ce d'autant plus que la Caravelle était connue pour son confort²⁰ et son intérieur cosy. De manière générale et comme le mentionnait également Mijanou Gold dans son travail, les objets contemporains, comme la Caravelle 12, sont considérés comme récents au sein des collections patrimoniales, par comparaison avec des collections archéologiques. Dès lors et auprès de l'opinion publique, ils se doivent de rester clinquants et représentatifs d'une certaine modernité²¹. Puisque seuls 12 exemplaires ont été fabriqués²², la Caravelle 12 a valeur de rareté et renforce la décision de mettre en œuvre des traitements de conservation-restauration adéquats visant à assurer la pérennité de son intégrité matérielle et immatérielle.

Cependant, un remplacement complet du rembourrage des sièges pourrait impliquer la disparition de marqueurs d'ancienneté des biens (traces d'usures, affadissement* des formes et des couleurs) ainsi que certaines informations scientifiques (traces d'usures révélatrices de la manière dont les sièges étaient utilisés)²³, autant de preuves que l'objet a appartenu au passé. Mais cette perte pourrait être minimisée par une documentation rigoureuse relative aux sièges et aux parties ainsi que par la mise en conservation à long terme d'échantillons²⁴ du matériau de rembourrage d'origine, qui permettra d'effectuer des travaux d'investigations complémentaires même après intervention. C'est sur ce dernier point que l'on peut mettre en évidence la complémentarité et l'indissociabilité des deux interventions de conservation-restauration majeures composant mon travail, soit la conservation des matériaux d'origine et le traitement visant à restaurer le rembourrage.

Le traitement²⁵ du rembourrage des sièges nécessiterait, quant à lui, un investissement financier conséquent mais les retombées économiques de l'intervention pourraient s'avérer intéressantes pour

¹⁹La prise en considération de la valeur d'usage est fondamentale dans l'élaboration de traitements de conservation-restauration de matériaux/objets « contemporains ». Chacun de ces derniers se définissant avant tout par leur utilisation. Ramel, 2007, p.2

²⁰ Facon, 2010, p.130

²¹ Gold, 2004, p.75

²² Facon, 2010, p.133

²³ De plus, le démontage des sièges nécessaire pour avoir accès à la mousse peut porter atteinte aux informations technologiques par les risques de pertes de marqueurs de l'assemblage d'origine des sièges. Gold, 2004, p.72

²⁴ Cette perte potentielle sera également réalisée au profit d'autres informations toutes aussi importantes, notamment une meilleure appréciation visuelle générale des sièges et de la cabine.

²⁵ Je parle de traitement et non pas exclusivement de remplacement car d'autres méthodes de substitution peuvent également être envisagées.

le musée. En effet la mise à disposition de la cabine de l'avion pour des reconstitutions cinématographiques ou encore l'intérêt que pourrait susciter auprès du public, la mise en exposition d'un avion qui fait partie intégrante du patrimoine technique français, pourraient, sur le long terme, apporter un certain retour sur investissement, tout en veillant à la conservation de l'appareil.

La légitimité d'un traitement des sièges pourrait se justifier par le fait qu'en cas de non-intervention directe ou par l'absence d'autres mesures de conservation-restauration, les conséquences pourraient être relativement importantes. La mousse continuera à se dégrader tout comme les autres parties constitutives des sièges (le contact permanent des housses ou de la structure métallique avec la mousse dégradée maintient les processus de formation de tache et de corrosion). Et plus on retarde l'étape de retrait de la mousse²⁶ plus cette opération sera compliquée, puisque la mousse, suivant son processus de dégradation, deviendra toujours plus pulvérulente*. Ceci nécessitera des travaux de nettoyage et de manutention plus importants (désolidarisation des blocs de mousses, importantes masses de poussières). Les échantillons prélevés risquent, sur la durée, de présenter un état de conservation davantage péjoré qu'à l'heure actuelle, desservant ainsi à leur conservation à long terme²⁷. Enfin, pour être en adéquation avec son PSC, il est du devoir du musée de tout mettre en œuvre pour assurer la conservation de ses collections et leur mise à disposition non seulement à la communauté scientifique mais également, dans les limites du possible, aux populations et leur transmission aux générations futures qui en sont les principaux « héritiers »²⁸.

1.3 Description de l'avion



Figure 2 La Caravelle 12 du Musée de l'Air et de l'Espace (Paris), aux couleurs d'Air Provence

L'avion de ligne présenté est une ancienne Caravelle de type 12 (*modèle SE.210 Caravelle 12*), plus communément appelée « Super 12 », construite par Aérospatiale France et destinée à des moyen-courriers. Immatriculée F-GCVL, elle est aux couleurs d'Air Provence International et inventoriée sous

²⁶ Etape indispensable en cas de remplacement total ou d'autres traitements (ex : consolidation)

²⁷ Plus l'échantillon prélevé présentera à la base un bon état de conservation, plus il a de chances de se conserver sur le long terme.

²⁸ UNESCO, 2014 [en ligne]

le numéro 996/65/1²⁹. L'appareil a été acheminé en vol au Bourget le 22 décembre 1995. Il totalisait plus de 56000 heures et était en bout de potentiel³⁰. A l'heure actuelle, la Caravelle se tient en extérieur sur le site non visitable de Dugny où se trouvent les dépôts de Conservation-Restauration³¹, à quelques centaines de mètres des espaces d'expositions.

Un historique et un tableau chronologique des différents modèles Caravelle est à consulter *en annexe 2, p.4*.

La morphologie de l'avion est similaire aux autres modèles Caravelle : ce dernier se présente comme un monoplane biréacteur à structure métallique, doté d'une paire d'ailes basses et planes, légèrement en flèche (formant un angle de 20°). Un escalier escamotable est intégré à l'arrière de l'appareil et constitue avec les turboréacteurs placés à l'arrière du fuselage les 2 marques de fabriques des avions Caravelle. Bien que l'usinage de la plupart de ses pièces et son assemblage final s'effectuait sur le territoire français, le cockpit avant est une reprise des avions britanniques Comet et les ailerons et empennages* sont réalisés dans les entreprises Fiat de Turin³². La Caravelle 12 est une version rallongée de la Super Caravelle (allongement de plus de 3 mètres) mais ses équipements techniques (trains d'atterrissage, systèmes électriques et hydrauliques, pneumatiques, turbines, freins) restent les mêmes. La seule différence notable avec son prédécesseur est le renforcement de la partie centrale de son fuselage permettant une plus grande capacité d'accueil, un agrandissement des issues de secours (équipées de toboggans gonflables) et l'augmentation de son conditionnement d'air, faisant d'elle le modèle le plus lourd et le plus spacieux de la gamme Caravelle³³. L'appareil était vendu pour un peu plus de 5 millions de dollars³⁴.

Un tableau récapitulatif de ses caractéristiques techniques est à consulter en *annexe 3, p.9*.

1.4 Description de la cabine et des sièges

1.4.1 Cabine

La cabine des Caravelles 12 se décline selon quatre aménagements. La Caravelle 12 du Bourget présente elle un aménagement dit de haute densité³⁵. Elle comporte 141 sièges passagers (5 sièges « Luxes » et 136 sièges « Espaces »³⁶) et 6 sièges d'équipages (2 sièges pilotes, 2 co-pilotes et 2

²⁹ Rabier, 2014, *entretien oral*

³⁰ Laurent Rabier, 2014, *entretien oral*

³¹ Le site de Dugny accueille non seulement les avions en attente de restauration (dans des hangars ou simplement sur le tarmac) mais également ceux déplacés expressément des surfaces d'exposition en raison de grandes manifestations comme le salon du Bourget. Ceci implique qu'ils peuvent être régulièrement déplacés. Pour exemple, la Caravelle 12 concernée avait changé de place entre mes deux premiers déplacements au musée, mais toujours selon la même orientation.

³² Musée Aeroscopia, 2014 [en ligne]

³³ Pichon, 2011 [en ligne]

³⁴ Sud-Aviation, 1969, note n°118 *non publié*

³⁵ Les schémas de la cabine sont à consulter en annexe 4, 11.

³⁶ Les sièges dits « Luxes » correspondent aux passagers 1^{ère} classe et ceux « Espaces » à la classe Economique.

Stewart). La cabine de l'avion se compose de deux parties, soit le cockpit (ou cabine de pilotage) placée à l'avant et la cabine passagers. A l'arrière de cette dernière se tient deux cabines WC et les anciens compartiments de rangements des repas.

La cabine passagers présente au sol une moquette de couleur brune avec des motifs aux contours noirs en forme de T. Des compartiments de rangements (composés de longs plateaux avec des filets) situés en partie haute sont disposés de chaque côté de la cabine. Un voile beige clair tendu est maintenu tout le long de la partie centrale du plafond. Ses parois sont de couleur blanc cassé tandis que les cloisons la séparant du cockpit et des WC présente une surface en faux-plaqué bois. Concernant les appareillages électriques, on notera la présence de cinq luminaires répartis le long du plafond, des panneaux lumineux signalétiques (EXIT ; attachez vos ceintures) et des dispositifs comportant des ventilations et des lumières individuels ainsi qu'un bouton d'appel du personnel de cabine placé au-dessus de chaque rangée*.

Plus spécifiquement à la cabine de pilotage, en plus des sièges pilotes et copilotes, on retrouve l'imposant dispositif de commandes de l'appareil avec notamment ses différents écrans de navigation et les manettes de contrôle de vol.



Figure 3 Vue l'intérieur de la cabine passagers (à gauche) et celle de pilotage (à droite)

Constat d'état

Outre l'état des sièges (sur lequel nous reviendrons en points 1.4.2), plusieurs éléments constitutifs de la cabine comportent des altérations et cette dernière dispose d'un état de salubrité général péjoré³⁷. En effet, de nombreux déchets ménagers sont répandus sur le sol, de même que diverses pièces métalliques, des cadavres de mouches et de guêpes (même des nids), des fientes et des pelotes de réjections d'oiseaux mais aussi des excréments de rongeurs. De nombreux insectes vivants (scarabées, mouches,...) ont été retrouvés durant l'examen. D'un point de vue olfactif, une odeur de âcre et même d'urée est directement perceptible dès le franchissement de l'entrée. Par ailleurs, la moquette est décollée en plusieurs endroits et présente des trous et des déchirures. Les

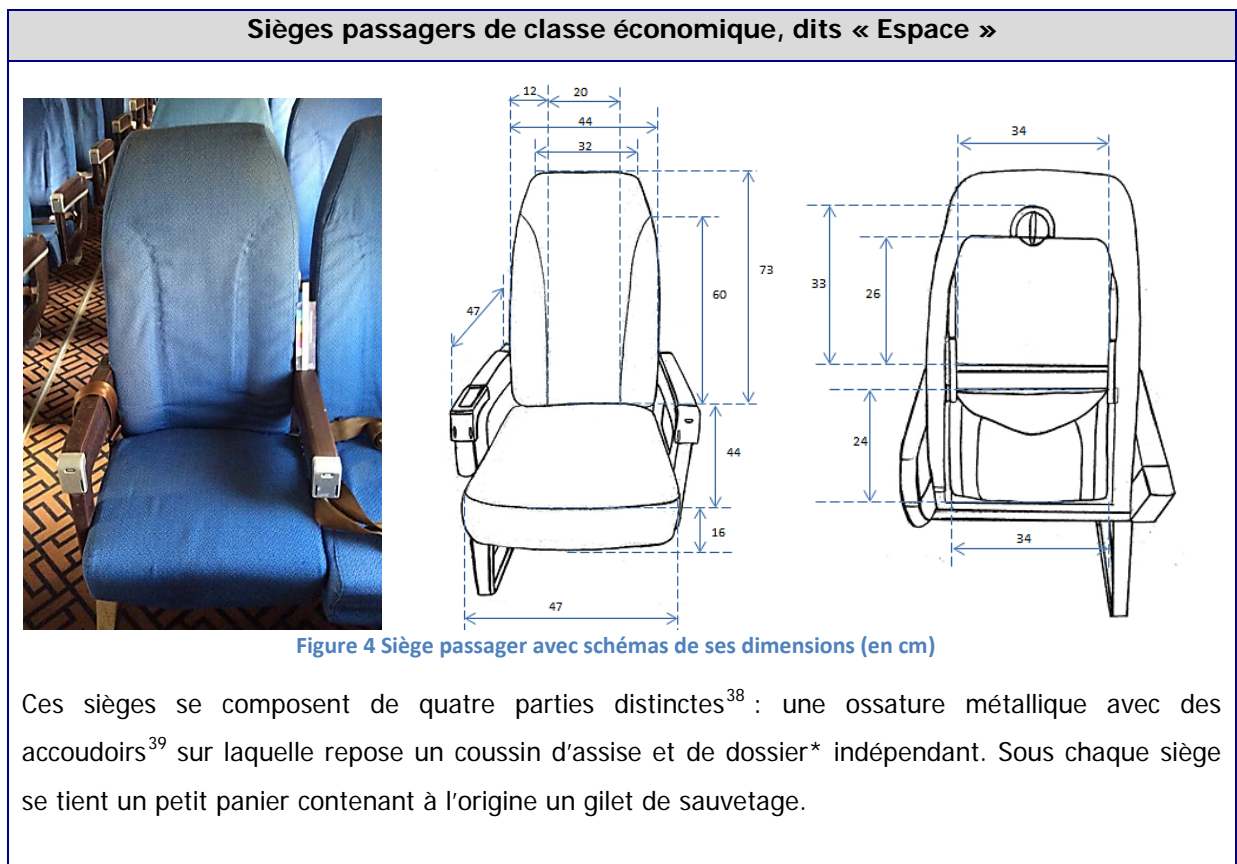
³⁷ Voir les photographies des altérations en annexe 5, p. 15.

compartiments de rangements des denrées alimentaires sont lacunaires, de même que certains éléments des WC. Le vitrage des cadrans de différents instruments composant les commandes (indicateur de vitesse ; horizon artificiel ; altimètres ; jauge de carburant ; thermomètres,..) présente de nombreuses marques d'abrasions ainsi que des cassures et certains éléments sont mêmes lacunaires (notamment au niveau des manettes de vol). Des zones ajourées ont pu être observées, notamment au niveau de la cabine de pilotage. A noter que l'éclairage au sein de la cabine ne fonctionne pas.

1.4.2 Sièges

Une numérotation des sièges est déjà existante (celle utilisée par la compagnie pour l'attribution des sièges aux passagers). Un numéro suivi de lettres est présent au-dessus de chaque rangée (au niveau des compartiments de rangement). Pour la description des sièges j'ai ainsi réutilisée ce système de numérotation (voir *annexe 4, p.11*).

Parmi les 147 sièges que comporte l'appareil, on distingue 6 types différents : 2 types de sièges passagers (124 de classe économique et 7 de 1^{ère} classe) et 4 types pour les membres d'équipage (soit les sièges pilotes, 2 types de sièges copilotes et enfin les sièges Stewart).



³⁸ Se référer à l'*annexe 6, p.16* pour les parties constitutives d'un siège d'avion.

³⁹ Les accoudoirs du milieu sont en communs.

Coussin de dossier : section de mousse souple, recouverte d'une housse de tissus en coton et fibres de polyester (bleue ou orange⁴⁰), de forme quadrangulaire se terminant légèrement en ogive au niveau de la tête et comporte un relief sur les côtés, permettant une pose confortable du dos (coutures présentent sur la housse au niveau des zones de reliefs latérales). Le coussin du dossier est indépendant du coussin d'assise (mais ils sont néanmoins reliés par un velcro) et est installé sur une armature de fond métallique, inclinable jusqu'à un angle de 20° vers l'avant (voir schéma). A l'arrière du dossier se tient une petite tablette rétractable en polymère de synthèse rigide et une pochette tenue par un velcro placée juste en dessous (qui permettait de ranger les effets personnels). La portion de l'arrière du dossier, sur laquelle se plaque la tablette, est tapissée de cuir tendu, tandis qu'une mousse rigide de couleur pourpre forme une bordure.

Coussin d'assise : section de mousse souple, de forme quadrangulaire avec un rabat à l'avant et reposant sur un dispositif de toiles tendues. Le coussin est maintenu dans une housse (bleue ou orange).

Ossature métallique porteuse : structure en aluminium (métal très apprécié dans le domaine aéronautique pour sa légèreté⁴¹) présentant un revêtement de couleur rosé. Elle se compose de l'armature de fond du dossier (présentant un quadrillage) et celle de l'assise, reliée par un mécanisme de liaison (sorte d'axe permettant l'inclinaison du siège). En dessous de l'assise se tiennent deux toiles tendues par un système de ressorts et de velcros, surplombant une plateforme métallique en forme de cuvette au niveau de laquelle s'établissent les connexions entre les différentes parties du siège. Cette dernière est commune pour les sièges composant la rangée et repose sur deux pieds.

Accoudoirs : parties en aluminium, matelassés de cuir (avec rembourrage en mousse fin sur le dessus). Ceux présents au milieu de la rangée sont rétractables (forme légèrement différente que ceux placés aux extrémités qui sont fixes) et intègrent à l'avant un cendrier en aluminium.

A noter également la présence de ceintures individuelles en tissus synthétique avec des embouts en aluminium, formant un système accrochage. Les ceintures sont constituées de 2 parties, une section d'accroche (45 cm) et une section comportant le crochet (61 cm).

⁴⁰ La couleur des housses de sièges est majoritairement bleue, bien que certaines soient orange. Le schéma de la cabine (disponible en *annexe 4, p.14*) présente individuellement la couleur de chacune des housses de protection des sièges (passagers et pilotes), permettant d'éviter les erreurs de remontage post-traitement des sièges.

⁴¹ Aluminium, 2015 [en ligne]

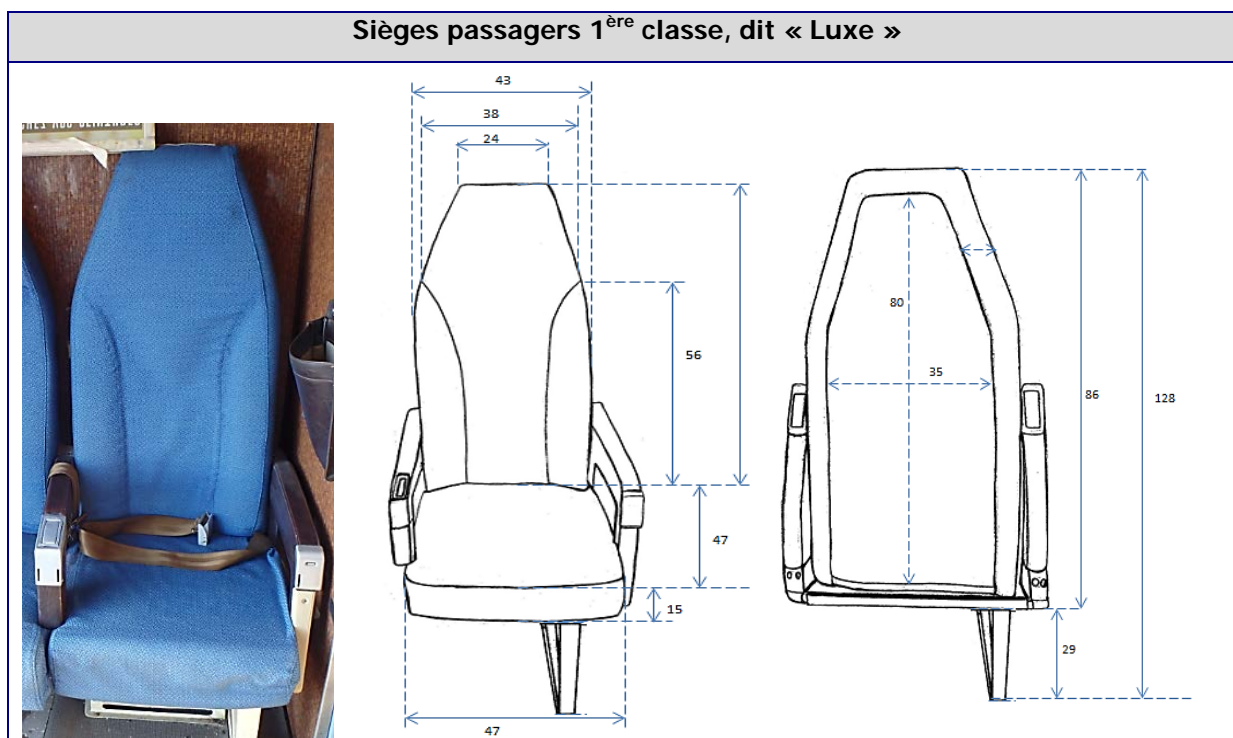


Figure 5 Siège passager "Luxe" avec schémas de ses dimensions

La composition des sièges « Luxe » est similaire à celle des sièges « Espace », à la différence que le dossier est plus haut.

Constat d'état général des altérations des sièges passagers :

Ossature métallique : perte de revêtement rosé visible, avec signes de corrosion du métal. De manière générale, le système d'inclinaison des sièges est quelque peu grippé.

Housse : tâches brunâtres (1-6 cm de long), avec des zones d'abrasion et de décoloration. Certaines portions des coutures son décousues et des dépôts exogène sont visibles en surface (fientes d'oiseau, terre, fragments de mousse, insectes,...). La couleur de housses des coussins d'assises est parfois différente de celle du dossier. A noter la disparition de toutes les housses de tête, habituellement présentes dans les avions Caravelle des années 80.

Coussin d'assise/dossier: déformations visibles (on voit assez clairement que la housse est non tendue et ajustée sur certains sièges). La mousse de rembourrage est particulièrement pulvérulente⁴². Certains velcros sont décollés/décousus partiellement, avec une perte générale d'adhérence. De nombreux coussins d'assises n'en disposent plus. La mousse de rembourrage est directement visible

⁴² La description complète des mousses de rembourrage est à consulter en *annexe 8, p. 22-28*

en certaines zones (notamment en partie basse des côtés du rabat du coussin d'assise).

Accoudoirs : des zones de gerçures et des déchirures du revêtement en cuir sont visibles. Le cendrier présente également des marques d'enfoncement et d'abrasions.

Autres : certaines pochettes à effets personnels sont arrachées de même que certains paniers de gilets de sauvetages sont lacunaires (par contre aucun gilet de sauvetage n'est encore présent !). Par ailleurs, certaines parties métalliques des ceintures présentent des zones de corrosion.



Figure 6 Pertes de revêtement de l'ossature en métal

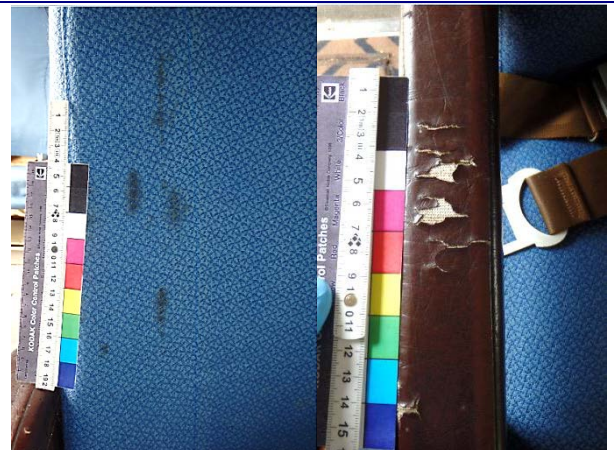


Figure 7 Housse tâchée et gerçures du revêtement des accoudoirs

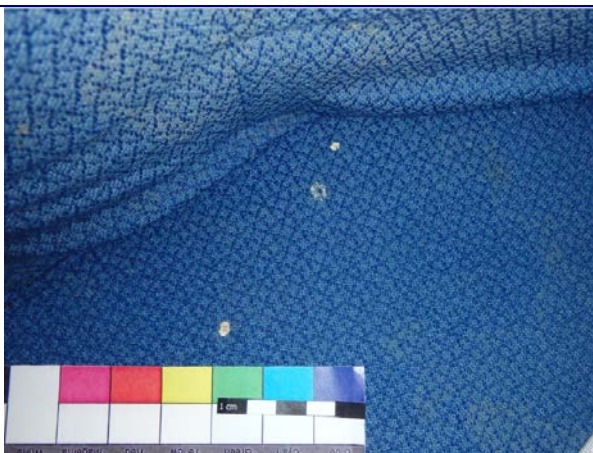


Figure 8 Fientes d'oiseaux sur la housse



Figure 9 Cendrier avec marques d'enfoncement

La description des autres types de sièges est à consulter en *annexe 7, p.17*

1.5 Description de la mousse de rembourrage

Pour décrire le plus précisément possible la mousse de rembourrage constitutive des différents sièges, j'ai procédé à la mise à nu d'un, voire de plusieurs exemplaires (dans le cas des sièges passagers) des

modèles existants⁴³. Ainsi plusieurs types de mousse et configuration ont pu être identifiés au sein même d'un seul type de siège ainsi que plusieurs états de surfaces au sein d'une même mousse.

Le tableau récapitulatif des différents types de mousses et états de surface rencontrés est à consulter en *annexe 8, p.22-28* et fait également office de constat d'état.

Sièges passagers « Espace »

Au sein de cette catégorie de sièges, 3 modèles se distinguent par la configuration de leur rembourrage et les types de mousses utilisés.

Modèle 1 (ex : 3F)

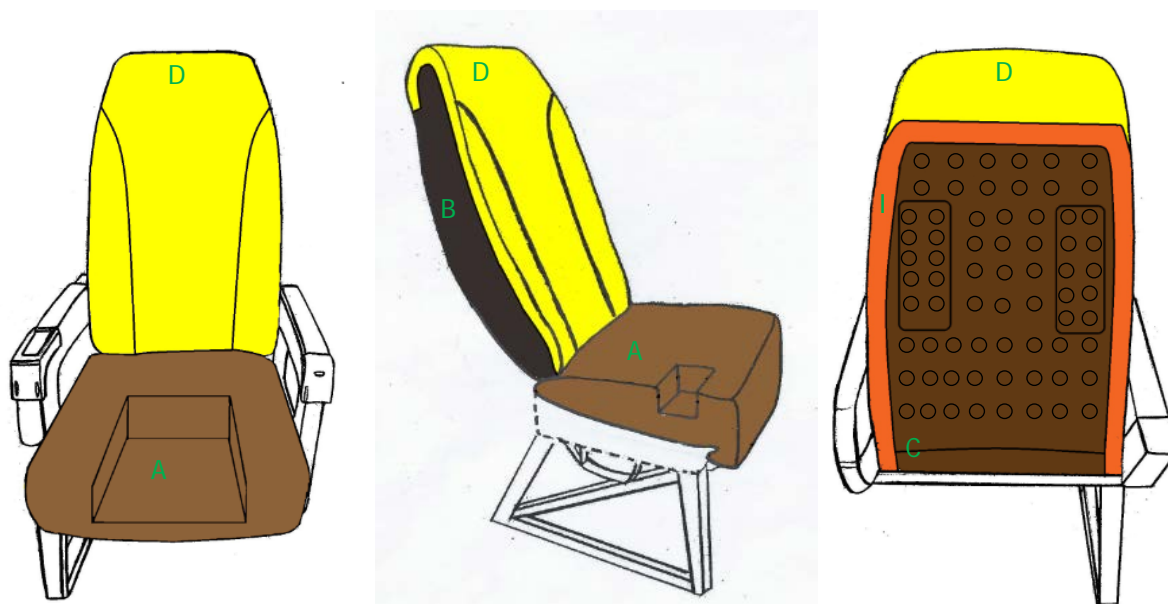


Figure 10 Configuration du rembourrage en mousse des sièges passagers modèle 1

Assise : composée d'un seul bloc de mousse de type A⁴⁴ (présentant les états de surface A1, A2 et A3).

Dossier : composition dite en «sandwich», comportant en surface une mousse jaune de type D (avec état de surface D1 et D2) placée au-dessus d'un bloc de mousse de type C (présentant les états de surface C1). Une mousse plus foncée de type B recouvre les flancs du dossier.

⁴³ « Mise à nu » effectuée selon les protocoles de retrait spécifiques présents en *annexe 10, p.30-40*

⁴⁴ Pour le code lettré des mousses, se référer à *l'annexe 8, p.22-28*

Modèle 2 (ex : 7C)

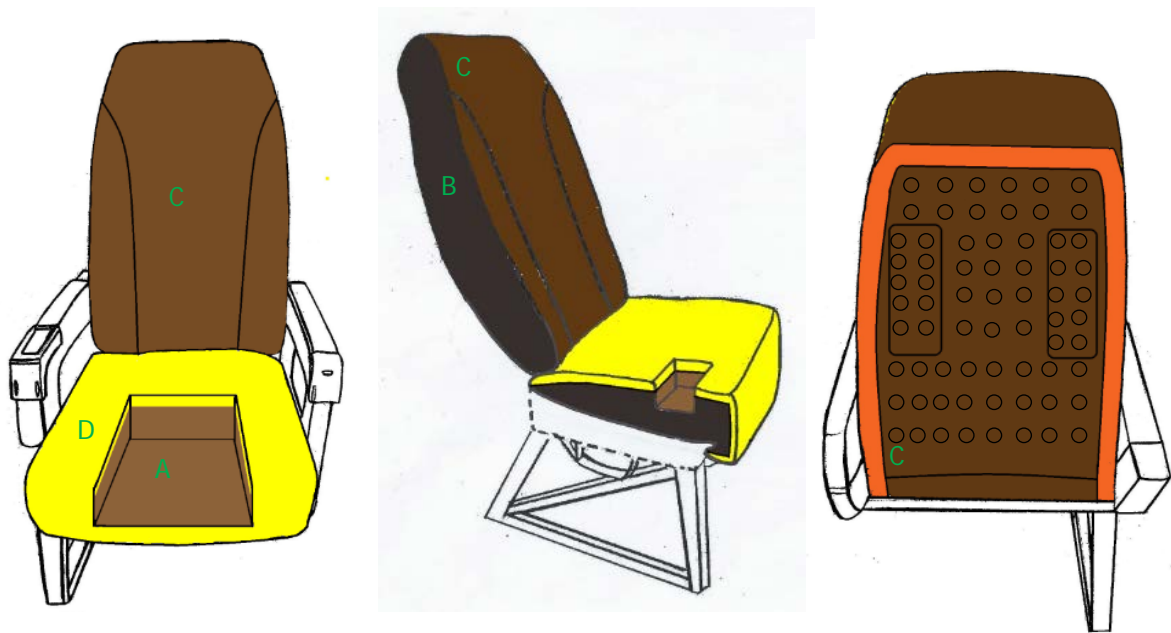


Figure 11 Configuration du rembourrage en mousse des sièges passagers modèle 2

Assise : composition en sandwich, comportant en surface une mousse jaune de type D (avec états de surface D1-D2) recouvrant un bloc de mousse de type A (présentant les états de surface A1 et A2).

Dossier : composé d'un seul bloc de mousse de type C (avec état de surface C1 et C2). Une mousse de type B recouvre les flancs de l'assise et du dossier.

Modèle 3 (ex : 25D)

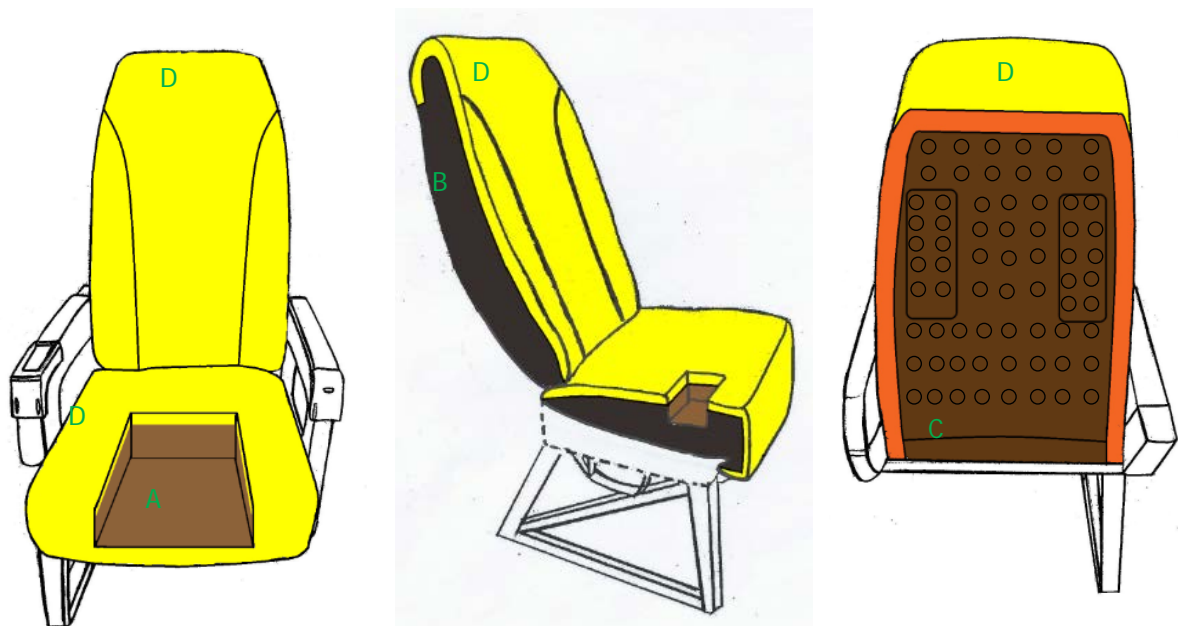


Figure 12 Configuration du rembourrage en mousse des sièges passagers modèles 2

Le modèle 3 est un assemblage du rembourrage de l'assise du modèle 2 avec le dossier du modèle 1.

Assise : composition en sandwich, comportant en surface une mousse jaune de type D (avec états de surface D1-D2) recouvrant un bloc de mousse de type A (présentant les états de surface A1 et A2).

Dossier : composition dite en «sandwich», comportant en surface une mousse jaune de type D (avec état de surface D1 et D2) placée au-dessus d'un bloc de mousse de type C (présentant les états de surface C1). Une mousse de type B recouvre les flancs de l'assise et du dossier.

De manière générale pour les sièges passagers, un tissu de lin de couleur beige clair collé à la mousse joue le rôle d'intercalaire entre cette dernière et l'ossature métallique du siège. Par ailleurs, dans le cas de nombreux sièges, ce tissu est lacunaire, décollé partiellement ou même, a disparu.

Technique d'identification/différenciation des modèles de sièges passagers

Après avoir caractérisé le plus précisément possible les différents types de mousse et états existants et s'être familiarisé avec les différentes textures, notamment la souplesse*, il est assez facile par une simple pression exercée avec la main sur les coussins d'assise et du dossier, de définir la composition qui se cache sous la housse du siège et donc du modèle en présence. En effet, 2 types de mousses se retrouvent en surface des coussins d'assise : soit une mousse brune de type C2 (pour le dossier) ou marron de type A3 (pour l'assise), qu'on sent légèrement craqueler lors de la pression, soit une mousse jaune de type D, plus souple et qu'on sent assez rapidement reprendre la forme après pression. Une fois le type de mousse superficielle identifiée, on peut en déduire directement la composition du siège en question sans avoir à retirer la housse. Ex : si la mousse du dossier présente une bonne résilience*, soit une de type D) et la mousse de l'assise craquèle sous la pression (soit une de type A3), on peut être quasiment certain d'être en présence d'un siège passager de modèle 1).

Pour vérifier cette technique simple et rapide d'identification, je l'ai pratiqué sur cinq sièges en inscrivant le type de configuration suspecté. Puis j'ai vérifié si les résultats obtenus étaient cohérents avec la réalité, en dehoussant les sièges testés⁴⁵. Pour tous les sièges testés, la configuration qui leur était attribuée par le simple test de pression s'est révélée exacte.

Ceci m'a permis de définir également la proportion de modèles 1, 2 ou 3 au sein de l'ensemble des sièges passagers. Au vu du grand nombre de sièges en présence, j'ai extrapolé ce test du « toucher » sur une vingtaine de sièges placés à divers endroits de la cabine, aussi bien en arrière qu'en avant,

⁴⁵ Certains sièges testés n'ont pas pu être démontés pour la vérification, puisque certaines parties de leur rembourrage étaient déjà partiellement mises à jour (zones présentant des déchirures ou un mauvais état du velcro).

afin d'obtenir le % final de chaque modèle. Ainsi, le modèle 1 représente 20% des sièges ; le modèle 2, 45% et le modèle 3, 35%.

Influence de l'emplacement des sièges passagers sur l'état de conservation des rembourrages

L'état de conservation des sièges passagers ne dépend pas uniquement du type de mousse le constituant, mais également de son positionnement au sein de la cabine. Ainsi, après un examen approfondi, les observations suivantes ont pu être faites :

Travées A et F : rangées de sièges passagers les plus dégradées. Ces derniers présentent des housses particulièrement décolorées et les déformations du rembourrage les plus importantes. Les mousses constitutives sont particulièrement pulvérulentes, dures et foncées. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces rangées se trouvent à proximité des hublots et sont donc particulièrement exposées à la lumière⁴⁶ du jour. La travée* F (côté ouest) est encore davantage dégradée que la travée A.

Travée B et C : rangées présentant le meilleur état de conservation des mousses de rembourrage (les plus résilientes). Par contre les housses des sièges comportent davantage de marques d'abrasion de même que les coins avant des coussins d'assises donnant sur le couloir (petits tas de poussières/débris de mousse présents juste en dessous). Ceci est certainement dû au fait que ces parties se trouvent directement sur le chemin des passagers, traversant le couloir. Des contact/chocs mécaniques peuvent ainsi fréquemment se répéter avec celles du bas du corps des passagers, notamment à cause de l'étroitesse du passage et des secousses de l'avion.

Section D : mousse de rembourrage des sièges un peu plus rigide/dégradée que celle des rangées B et C, mais leurs housses sont en meilleur état.

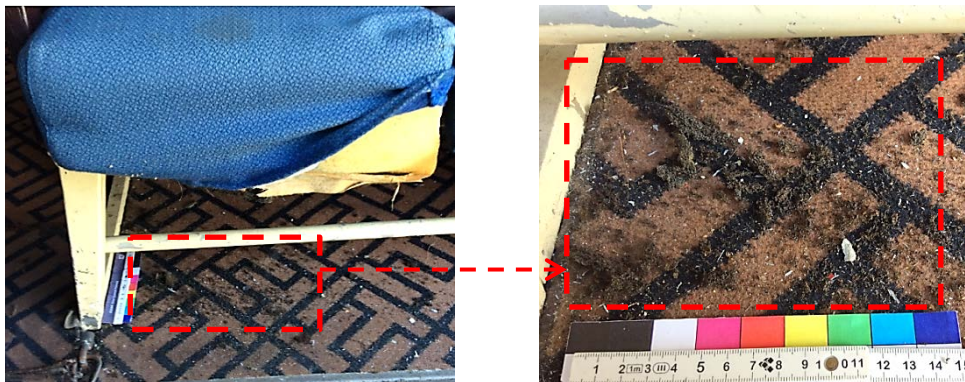


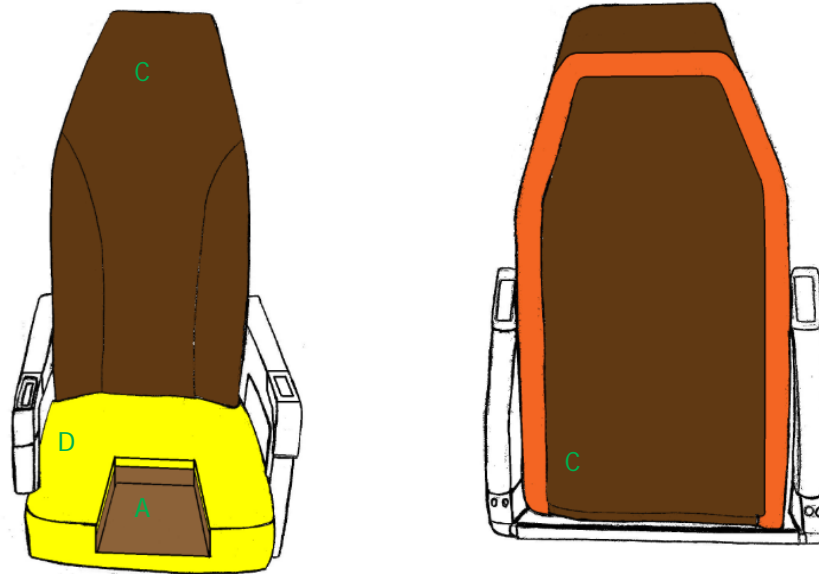
Figure 13 Illustration de la pulvérulence de certaines mousses

⁴⁶ Voir chapitre 2.3.5, p.40 consacré aux facteurs de dégradation.

A noter encore que les sièges passagers avec une housse orange ne présentent pas une configuration différente des autres sièges, certains sont de type 1 et d'autres de type 2 ou 3.

Siège passagers « Luxe »

Les sièges passagers « Luxe » disposent d'une configuration similaire au modèle 2 des sièges de classe économique.



Assise : composition en sandwich, comportant en surface une mousse jaune de type D (avec états de surface D1-D2) recouvrant un bloc de mousse de type A (présentant les états de surface A1 et A2).

Dossier : composé d'un seul bloc de mousse de type C (avec états de surface C1 et C2). Une mousse de type B recouvre les flancs de l'assise et du dossier.

La description du rembourrage des autres types de sièges est à consulter *en annexe 9, p.29*.

2. Documentation relative au matériau

2.1 Echantillonnage

Certains tests et analyses destinés à l'identification des mousses de rembourrage, comme les micro-tests chimiques, l'analyse FTIR ou encore l'observation sous microscope ont nécessité la prise d'échantillons *in situ*. Pour que la campagne d'identification soit des plus précises, chaque type de mousse de même que chacun des états de surfaces qu'elles présentaient, ont fait l'objet d'un

prélèvement. Bien qu'il ne s'agisse que d'échantillons de taille réduite⁴⁷, il n'en demeure pas moins que l'échantillonnage reste une étape complexe, dépendant de nombreux facteurs et qui nécessite une réflexion rigoureuse et globale autour de l'objet. C'est pourquoi un protocole et une fiche d'échantillonnage ont été établis en amont (en *annexe 10.*, p.30-40) Ces derniers retracent la méthodologie et le raisonnement inhérents à la mise en œuvre, les différents choix qui se posent (emplacement, nombre, moyens utilisés) et permettent une traçabilité systématique de l'action.

2.2 Techniques d'identification de la mousse

Pour émettre des propositions de conservation-restauration adaptées à la situation, il est primordial de savoir à quel type de matériau nous sommes confrontés. En effet, tout projet de conservation-restauration nécessite au préalable d'identifier le matériau de manière à pouvoir se renseigner sur ses spécificités (composition, processus de dégradation,...) et ainsi développer des stratégies optimales pour le stockage à long terme et les autres traitements de conservation-restauration envisagés⁴⁸. Bien que certains polymères de synthèse partagent des caractéristiques similaires, chacun possède ses spécificités et fait l'objet de processus de dégradation propres à sa nature. Depuis le développement des méthodes de synthétisation des matières dites plastique, une grande variété de mousses a été créée et se retrouve aujourd'hui dans la composition de nombreux objets patrimoniaux, qu'il est souvent difficile d'identifier ou de les différencier⁴⁹. Pour preuve de la grande diversité de ces matériaux, on peut observer au sein d'une même famille de mousses (ex : le polyuréthane) plusieurs types (mousse de polyuréthane de type éther ou ester)⁵⁰. Dans le cas présent, le conservateur suppose qu'il s'agit de mousse de polyuréthane, mais ni lui, ni même les archives, ni les autres sources d'informations dont dispose le musée, ne sont à même de le confirmer. Raison pour laquelle des tests d'indentification doivent impérativement être menés en amont de toutes opérations de conservation-restauration.

La méthodologie inhérente à l'indentification d'un matériau doit respecter plusieurs principes de base à savoir : commencer par les méthodes les plus simples aux plus compliquées ; des plus disponibles aux moins disponibles ; des moins coûteuses au plus coûteuses et enfin des méthodes d'observations/d'analyses les moins destructives au plus destructives⁵¹.

Il est également essentiel, après chaque examen effectué, de se questionner sur le besoin ou non d'effectuer une étude plus approfondie et si oui, de pouvoir justifier son choix, ceci pour éviter toute systématisation et examens superflus, synonymes de perte de temps et d'argent.

Dans cette optique, j'ai tout d'abord procédé à un examen comparatif du matériau avec la documentation existante sur les mousses, pour tenter de la confondre au sein des différents types

⁴⁷ Les prélèvements effectués à même la mousse ne dépassent pas le 1cm³.

⁴⁸ Shashoua, 2006, p.195

⁴⁹ Van Oosten, 2002, p.89

⁵⁰ Foam Factory, 2011 [en ligne]

⁵¹ Degriigny, 2014, *non publié*

existants et sans l'utilisation d'appareillage. Suite à cela, j'ai tenté de confirmer et de préciser davantage la nature du matériau en effectuant successivement une observation sous microscope optique et une sous microscope à balayage électronique (MEB), des analyses élémentaires (grâce au dispositif EDS ⁵²couplé au MEB), des micros-tests chimiques et enfin une spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (ou analyse FTIR).

2.2.1 Examen comparatif avec la documentation existante

Sans appareillage ou technologies complexes, on peut malgré tout parvenir à supposer le type de mousse en présence. Par exemple une analyse FTIR peut poser bien des problèmes aux institutions qui n'ont pas les moyens ni l'accès à ce type d'appareillage ou lorsque la politique du musée ne tolère pas l'acte invasif et destructif de ce type d'analyses (bien qu'il s'agisse que de micro-prélèvements). Raisons pour lesquelles il est important de pouvoir disposer d'outils simples et faciles à mettre en œuvre pour procéder à une identification du matériau débouchant sur des propositions de traitements de conservations-restaurations adaptées. La méthodologie idéale à appliquer pour l'identification est d'utiliser en premier lieu des « tests » d'observation et de confirmer par la suite ses conclusions/observations avec des méthodes d'analyses plus poussées. Ceci permet d'ailleurs de créditer et de démontrer ou non qu'une observation attentive permet d'identifier de façon adéquate le matériau, bien qu'elle puisse sembler générale⁵³. Cette étude préliminaire consiste en une multiplication d'indices permettant d'identifier sa nature de manière plus ou moins précise. Ainsi plus on en emmagasine, plus l'identification sera précise et formelle.

Pour procéder à l'identification du type de mousse composant les sièges selon la documentation, je suis parti des impressions des conservateurs-restaurateurs du musée qui s'accordaient à dire qu'il s'agissait de mousse de polyuréthane. Ceci m'a aidé à aiguiller les observations, analyses et tests à mettre en œuvre pour confirmer et préciser la nature des mousses de rembourrages en présence. Comme la consultation des archives, des livrets de services et autres documentations relatives à l'avion, n'a rien révélé concernant la nature du rembourrage des sièges, il a fallu donc appréhender la situation selon une autre approche.

On peut se pencher tout d'abord sur deux aspects du matériau, son apparence et son odeur puis sur l'identification de ses propriétés mécaniques⁵⁴. Cette manière de procéder a l'avantage d'être simple et est en général non-destructive.

Apparence

L'identification des polymères par l'observation, notamment la couleur, est surtout applicable pour les polymères datant des années 1850 à 1970. Après cela, les progrès de mise en œuvre ont été tels que

⁵² Détecteur d'énergie dispersive

⁵³ Quye et Williamson, 1999, p.54

⁵⁴ Shashoua, 2006, p. 195

tous les polymères de synthèse, en l'occurrence les mousses (PE, PP et PE), pouvaient prendre l'apparence caractéristique de son voisin rendant ainsi toutes appréciations visuelle moins pertinente⁵⁵.

Ainsi, la couleur peut être un indice à exploiter pour l'identification de la mousse, en gardant en tête qu'il ne s'agit pas d'un critère absolu. De manière générale, la mousse de polyuréthane est connue pour présenter une couleur jaune ambrée, pouvant s'assombrir en vieillissant et ainsi prendre des teintes oranges ou brunes, avec des nuances verdâtres. Elle peut même devenir complètement noire. Par ailleurs, les teintes jaunes de base peuvent varier des plus pâles (jaune « soufre ») au plus foncé (jaune moutarde)⁵⁶. On peut également observer des mousses de PUR présentant à la base une couleur ocre. On notera que la mousse de PUR est également connue pour être systématiquement opaque, à l'inverse de certains types de mousses PE ou PE pouvant être translucides⁵⁷. La couleur et l'opacité des différents types de mousses observés *in situ* remplissent ce premier critère.

Un deuxième indice peut s'avérer être pertinent lorsque le rembourrage comporte une marque ou une étiquette, précisant le nom du fabricant, l'année et parfois même le type de matériau utilisé ou le numéro de brevet⁵⁸. Sous plusieurs mousses d'assises, une étiquette était présente. Bien que cette dernière ne présente pas d'information quant à la nature du matériau en présence, elle porte le nom du fabricant (Metzeler) et l'année de production (1989), éléments qui se sont avérés très utiles dans cette recherche d'identification. Metzeler est une société allemande fondée en 1863 (rachetée par Pirelli en 1986), tout d'abord spécialisée dans la fabrication de pneumatiques elle a, dans les années 90, étendu son secteur d'activité à l'aéronautique. Outre ses différentes sortes de caoutchouc, Metzler a produit une grande variété de polymères de synthèse dont la mousse de polyuréthane pour le rembourrage des sièges d'avions⁵⁹.



Figure 14 Etiquette présente sous le coussin d'assise de sièges passagers

Le style est également un marqueur qui peut aider à l'identification du matériau. La mousse de polyuréthane par exemple, est connue pour avoir été utilisée pour divers types de sièges contemporains, aux formes parfois très excentriques propres à certains designs des années 60 et 70⁶⁰. Dans le cas des sièges d'avions, ces derniers ne présentent pas de formes ni de marqueurs de style particulier, si ce n'est qu'ils sont représentatifs d'une production standardisée ou à la chaîne

⁵⁵ Quye et Williamson, 1999, p.55

⁵⁶ Pour la visualisation des couleurs, se référer à : Toutes les couleurs, 2014 [en ligne]

⁵⁷ Quye et Williamson, 1999, p.59-60 et 62

⁵⁸ Quye et Williamson, 1999, p.57-59

⁵⁹ Metzeler, 2015 [en ligne]

⁶⁰ Voir le Travail de Bachelor de Mme Mijanou Gold (Gold, 2004)

durant la période des Trente Glorieuses ⁶¹(1945-1974), où l'accent était mis sur la simplicité, le confort et l'aspect fonctionnel. Cette époque correspond à celle de la fabrication et d'utilisation de la mousse PU.

Les altérations présentées par le matériau peuvent également être caractéristiques du type de mousse en présence. Une des altérations propre à la mousse PUR* est qu'elle peut devenir particulièrement pulvérulente⁶². Ce phénomène a pu s'observer in situ notamment sur les mousses de type B. Des fissures cuboïdes*, comme observées sur la partie supérieure des mousses C2, sont également très caractéristiques du PUR⁶³. Par ailleurs, les mousses PUR sont particulièrement affectées par les changements de couleurs dus à une exposition aux rayons UV⁶⁴. Ce phénomène de dégradation a pu clairement s'observer sur les coussins d'assise (type A) dont le dessus (type A3, situé directement dans l'axe d'exposition de la lumière du jour) présentait une surface plus sombre que le dessous (Type A1/A2, épargné d'une exposition directe). La migration de plastifiants⁶⁵ ou autres adjuvants* en surface se caractérisant par des dépôts blanchâtres/brillants et collants*/poisseux* est également fréquente dans le cas de mousse PUR. Cette altération était perceptible dans le cas des mousses A3. Enfin, la mousse de PUR a la caractéristique de tacher et même corroder les éléments qui lui sont annexés (en contact direct) en vieillissant⁶⁶. Les taches brunâtres retrouvées sur de nombreuses housses de protection ou encore les signes de corrosion des attaches des ceintures confortent l'idée qu'il s'agit bien de mousse PUR.



Figure 15 Mousse se délitant, avec présence d'une fissure cuboïde

Pour faciliter l'identification visuelle, l'emploi d'une loupe ou compte-fil (agrandissement 10-20X) est conseillé.

Odeur

De nombreux plastiques disposent d'une odeur qui leur est propre, bien qu'elle ne soit pas toujours évidente à décrire. La mousse PUR n'échappe pas à cette règle, elle libère une odeur forte et âcre⁶⁷. En chauffant la surface par frottement à l'aide d'un chiffon propre (légèrement humide si possible) on multiplie l'odeur du matériau et cette dernière devient plus facilement identifiable⁶⁸. Par ailleurs,

⁶¹ Pittet, 2015, *entretien oral*

⁶² En anglais on utilisera le terme *crumbling* pour désigner ce type d'altération, qui peut traduire par émiettement ou par effritement. Van Oosten, 2002, p.91

⁶³ La poudre retrouvée au sol, à proximité d'une mousse est un indice fort de la présence de mousse PUR. Coles, 2009, p. 128.

⁶⁴ Voir chapitre 2.3.5, p.40, sur les facteurs d'altérations.

⁶⁵ Mercier et al., 1999, p.36

⁶⁶ Quye et Williamson, 1999, p.62-63

⁶⁷ Traduite en anglais sous le terme *Stinging*, pouvant se traduire dans la situation présente par une forte odeur qui « pique ou irrite le nez ». Coles, 2009, p. 128

⁶⁸ Shashoua, 2006, p. 196

dans le cas des sièges cette technique n'a pas été nécessaire, puisque dès le franchissement de la porte d'accès arrière, cette odeur était déjà bien discernable.

Propriétés physiques

Lorsque les informations directement disponibles sur la surface de l'objet sont insuffisantes, on peut procéder à la réalisation de tests mécaniques simples, servant à définir certaines propriétés physiques propres au matériau.

Les polyoléfines, dont la mousse PUR fait partie, comptent parmi les seuls plastiques à flotter sur l'eau⁶⁹. Chaque échantillon testé a démontré des aptitudes à flotter, malgré leur état de conservation parfois très péjoré⁷⁰.

La masse volumique ou densité du matériau peut également être caractéristique de sa nature⁷¹. Il est évident que dans le cas de mousses dégradées, comme celle composant le rembourrage des sièges de l'avion, cet indice perd de sa pertinence⁷². Par ailleurs, en ne considérant pas les résultats de ce type de mesure comme absolus mais plutôt comme des ordres de grandeur, ceci peut s'avérer être un indice supplémentaire. Tout comme pour les tests de flottaison, les densités mesurées sur les échantillons testés corrélaient avec les ordres de grandeur formulés par les fabricants. On notera tout de même une densité du matériau plus élevée en comparaison avec les mousses neuves. Ceci peut s'expliquer par les phénomènes de réticulation* s'opérant à l'intérieur du matériau en vieillissant. Comme le fait transparaître F. Rémillard dans son ouvrage consacré à l'identification des plastiques et des élastomères*, une mousse PUR réticulée présente une densité supérieure à une qui ne l'est pas⁷³.



Figure 16 Le test de flottaison nécessite que peu de moyens

On peut encore procéder à un test de dureté sur la mousse en griffant légèrement sa surface à l'aide d'un crayon ou d'un ongle⁷⁴. La mousse PUR est un polymère de synthèse qui se marque facilement à sec, en comparaison d'autres mousses⁷⁵. Une fois le test effectué sur les blocs de mousses, le résultat était sans appel, des marques résiduelles étaient bien visibles. Mais attention, ce test peut engendrer

⁶⁹ Test effectué avec une eau de 20°C. Quye et Williamson, 1999, p.66

⁷⁰ Les tests de flottaisons et de densité réalisés sont à consulter en *annexe 11, p.41-44*.

⁷¹ Rémillard, 2007, p, 2-3

⁷² Les processus de dégradation des mousses (oxydation,...) peuvent modifier la structure de base du matériau. Il est ainsi très probable que sa masse volumique en soit affecté.

⁷³ Rémillard, 2007, p, p.26

⁷⁴ Shashoua, 2006, p. 196

⁷⁵ Pour se représenter l'action, il ne faut pas enfoncer le crayon ou ongle plus de 2mm dans la mousse avant d'effectuer le geste de griffure.

une altération de l'échantillon, c'est pourquoi il est préférable de le réaliser à la fin de l'examen préliminaire.

Réflexion autour de la concordance de certains éléments observés

L'identification du matériau peut également se faire selon une démarche plus théorique visant à exploiter certains éléments explicites ou implicites du matériau.

Si l'on part du principe qu'il s'agit de mousse PU, on peut vérifier si la date de l'objet (ou ensemble) qui contient cette mousse est cohérent avec la date d'utilisation du matériau⁷⁶. Dans le cas présent, l'avion date du début des années 80, et certains blocs de mousse dateraient même de 1989, ce qui coïncide tout à fait avec la mousse PUR, dont la production et l'utilisation était déjà connue depuis 1940⁷⁷. On peut également se demander si le domaine d'application du matériau suspecté est cohérent avec les utilisations connues de la mousse de polyuréthane. Dans le cas présent, le matériau sert de rembourrage de sièges, qui n'est autre que l'une des utilisations des plus connues de la mousse souple PUR, notamment dans le domaine des transports⁷⁸. Si ces indices ne sont pas directement discernables sur le matériau, on peut également considérer sa technologie de mise en œuvre. Certains polymères de synthèse sont limités dans leur nombre de méthodes de production⁷⁹ –parfois à cause de leurs propriétés de base (thermoplastique, thermodurcissable, élastomères). Pour les blocs de mousses constituant le rembourrage des sièges de la Caravelle, on peut supposer une mise en œuvre par coulage dans un moule, qui permet d'obtenir des formes régulières, identiques et en série. Ce qui coïncide avec une des deux méthodes traditionnellement utilisées dans la production de mousse PUR⁸⁰.

Dans cette optique de raisonnement logique et pour aboutir à l'identification d'une mousse PUR un questionnaire simplifié⁸¹ est présenté en *annexe 13*.

2.2.2 Tests microchimiques

Plusieurs tests micro-chimiques permettant l'identification des polyuréthanes existent. Ces derniers ont l'avantage d'être simples à mettre en œuvre, d'utiliser des équipements et produits facilement accessibles et abordables d'un point de vue financier et de donner des résultats fiables et immédiats⁸². De plus, seul un petit fragment d'échantillon suffit pour les réaliser (de l'ordre du mm³ ou du mg). Par ailleurs, ces tests sont de l'ordre du semi-qualitatif, autrement dit, ils permettent de donner le composé principal (PUR) ou encore la catégorie du polymère testé (thermodurcissable), mais pas le type exact (ester ou éther)⁸³.

⁷⁶ Reuss, 1997, p. 56

⁷⁷ Un tableau chronologique de l'apparition des matériaux dits « plastiques » est à consulter en *annexe 12, p.45*.

⁷⁸ Ashby et Johnson, 2002, p.201

⁷⁹ Quye et Williamson, 1999, p.63

⁸⁰ Voir méthode de mise en œuvre, *chapitre 2.3.4, p.38*.

⁸¹ Questionnaire repris de Coles, 2009, p.129

⁸² Rémillard, 2007, p.3

⁸³ Gold, 2004, p.47

Test pH par pyrolyse

Ce test consiste à mesurer le pH des vapeurs de combustion se dégageant d'un échantillon passé à la flamme. Pour se faire, on place à l'intérieur d'une pipette l'échantillon à tester ainsi qu'une bande indicatrice pH, préalablement trempée dans l'eau. Une fois la pipette refermée par un bouchon, on porte l'extrémité capillaire à la flamme (où est logé l'échantillon). Les vapeurs qui en résultent réagissent avec la bandelette qui prend alors une couleur en fonction de l'acidité ou la basicité du produit⁸⁴. La mousse de PUR, par les composées qui la constitue, est de nature acide⁸⁵. Hors, en vieillissant, ce matériau tend toujours plus vers la neutralité d'un point de vue du pH, puisqu' il libère continuellement des composés volatils organiques (COV)* de nature azotée qui font son acidité de base. En fonction de l'âge des mousses de rembourrage des sièges, on peut ainsi s'attendre à des valeurs proches d'un pH 6-7 ou légèrement plus acide.

Après réalisation des tests, la plupart des mousses, à l'exception de deux, ont révélé un pH des vapeurs de combustion proche de 6 (5-5.5), ce qui coïncide tout à fait avec les valeurs présumées pour un tel matériau. Ceci prouve que la mousse présente encore une acidité et que, dans une moindre mesure, elle reste susceptible de dégager encore des COV corrosifs, bien que ceci tende à diminuer au fil du temps.

Les deux échantillons échappant à cette règle (TI.05.15⁸⁶ (type C1) et TI.06.15 (type B)), présentaient un pH basique plutôt bien marqué (respectivement 8 et 9.5). Après m'être renseigné auprès de professionnels⁸⁷, ceux-ci m'ont informé que cela ne signifiait pas pour autant qu'il ne s'agisse pas de mousse PUR. En effet, une forte quantité d'adjuvant de type basique, comme des charges inorganiques anti-oxydantes, utilisées dans la synthèse de la mousse⁸⁸, peuvent expliquer ce résultat⁸⁹. Cette supposition a pu être confirmée plus tard par l'analyse EDS et FTIR, qui a mis en avant une quantité importante de composés inorganiques au sein des deux échantillons en question⁹⁰.

Test olfactif

La plupart des polymères de synthèse possèdent une odeur spécifique, qui peut aider à leur identification. L'odeur peut, bien entendu, être ressentie directement sur le matériau faisant l'objet d'un prélèvement, mais il n'est pas toujours évident de la distinguer. En chauffant l'échantillon à l'intérieur d'une pipette, l'ensemble des fumées qui en résultent sont emprisonnées à l'intérieur du

⁸⁴ Rémillard, 2007, p.4-6

⁸⁵ pH des vapeur de combustion compris entre 2 et 3. Rémillard, 2007, p.23

⁸⁶ Pour le numéro d'identification se référer à *l'annexe 10, p.30-40*.

⁸⁷ Brambilla, 2015, *entretien oral* et Gueniat 2015 *entretien oral*.

⁸⁸ Voir chapitre 2.3.3, p.35, consacré à la synthèse du matériau.

⁸⁹ De plus, ces charges présentent une plus grande stabilité que certains composés de type acides composant la mousse. Ainsi, après dissipation de ces derniers, le pH de la mousse est donc susceptible de devenir basique. Wiles, 1993, p.110.

⁹⁰ La procédure de mise en œuvre du test et les résultats obtenus sont à consulter en *annexe 14, p.46*

contenant⁹¹. Ainsi, lorsque le bouchon est retiré, l'odeur du matériau est davantage concentrée et plus facilement détectable. Pour rappel, une odeur âcre qui « pique le nez » est caractéristique d'une mousse PUR.

Bien que la plupart des échantillons présentaient déjà cette odeur caractéristique, ce test a permis de le confirmer pour l'ensemble des prélèvements.

Test du comportement du matériau

Les plastiques sont classés en 3 catégories distinctes, à savoir : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères. Leur réaction face à la chaleur permet de les différencier, notamment les thermoplastiques des thermodurcissables. Ces derniers gardent leur forme jusqu'à ce que la température de combustion soit atteinte, tandis que les thermoplastiques passent par une phase où ils se ramollissent, puis fondent avant la combustion ou la décomposition à proprement parlé⁹². Cette observation, permet donc de définir la nature et la catégorie de plastique du matériau.

L'ensemble des échantillons testés ont réagi comme des thermodurcissables, catégorie de plastique à laquelle appartient la mousse de PUR⁹³.

Les tests olfactifs et le test du comportement du matériau s'opèrent en parallèle au test pH. Ainsi, lorsque le micro-prélèvement contenu à l'extrémité de la pipette est passé sur la flamme son comportement à la chaleur peut être observé et c'est après avoir retiré le bouchon que le test olfactif peut se faire. Cette manière de procéder permet d'économiser l'échantillon de base⁹⁴.

Test (Diméthylamino)benzaldéhyde

Ce test, qui permet d'identifier la présence de polyuréthane, repose sur la pyrolyse d'un microéchantillon mis au contact, par l'intermédiaire d'un coton-tige, d'un mélange composé d'une solution (diméthylamino)benzaldéhyde 14% avec une solution d'acide acétique concentrée⁹⁵. Si le coton se colore en jaune canari, cela signifie que le test est positif.

Concernant les échantillons de mousses testés, les résultats ont été sans équivoque : tous ont entraîné une coloration jaune au fond de l'éprouvette, même la mousse rigide de couleur pourpre prélevée (type I)⁹⁶.



Figure 17 Tous les tests se sont révélés positifs

⁹¹ Rémillard, 2007, p.4

⁹² Rémillard, 2007, p.4

⁹³ La classification de la mousse PUR au sein d'une des catégories de plastique peine à être clairement définie dans la littérature consultée, puisque le matériau partage des caractéristiques aussi bien avec les thermoplastiques que les élastomères. Le terme d'élastomère thermoplastique est parfois employé. Techniques de l'ingénieur, 2014 [en ligne]

⁹⁴ Rémillard, 2007, p.4

⁹⁵ Rémillard, 2007, p.20

⁹⁶ La procédure du test de même que le résultat des échantillons testés sont à consulter en annexe 15, p.49-51.

2.2.3 Observation sous microscope optique

L'utilisation d'un microscope optique permet de visualiser le matériau à un niveau de détail inaccessible pour l'œil humain⁹⁷. On peut ainsi mettre en évidence des changements de couleurs mais avant tout la structure de la mousse, éléments caractéristiques qui aident à son identification. Une structure alvéolaire en nid d'abeille, comme observée sur les échantillons prélevés, est représentative des mousses de polyuréthane⁹⁸.

Il est possible également d'observer des parois des cellules constitutives de la mousse rompues, altération type des mousses de PUR dégradées⁹⁹.

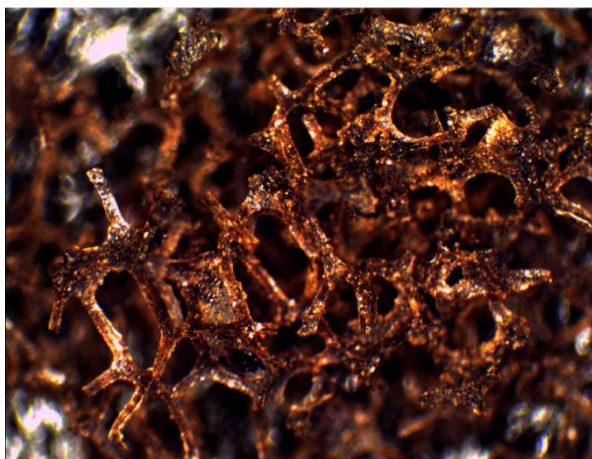


Figure 18 Echantillon TI.05.15 (x20)

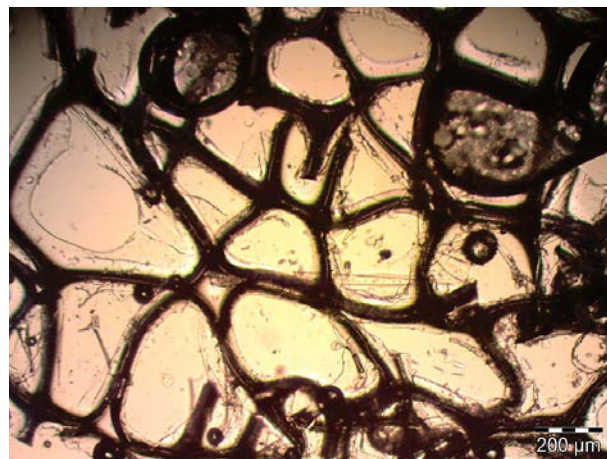


Figure 19 Structure en nid d'abeille propre aux mousses PUR

2.2.4 Observation sous MEB et microanalyse par EDS

L'observation sous MEB permet de visualiser l'échantillon avec un niveau de détail encore plus important que n'importe quel microscope optique¹⁰⁰. L'image obtenue en relief et en contraste noir et blanc permet également de mieux discerner la structure alvéolaire de la mousse. Ainsi on peut s'informer plus en détail sur l'épaisseur des arrêtes cellulaires, leur morphologie et leur diamètre ainsi que sur les micro-altérations. Ces éléments peuvent s'avérer très utiles pour différencier les types de mousse. A ce niveau de détail et au regard de l'état de conservation des échantillons prélevés, la mousse de polyuréthane peut être caractérisée par des cellules aux arrêtes bien distinctes, épaisses et à la surface ouverte partiellement voire complètement¹⁰¹.

La microscopie à balayage électronique peut également être très utile pour le suivi de l'évolution de la dégradation de la mousse de PUR (dans le cadre de tests de vieillissement accélérés par exemple)

⁹⁷ SGS, 2014 [en ligne]

⁹⁸ Gold, 2004, p.45

⁹⁹ Le principe de fonctionnement du microscope optique de même que les images obtenues sont à consulter en *annexe 16, p.52*

¹⁰⁰ Le détail de l'observation sous MEB à consulter en *annexe 17, p.57-60*.

¹⁰¹ Pellizzi, 2012, p.17-18

ou encore pour juger de l'influence d'un traitement de conservation-restauration appliqué sur la mousse¹⁰². En effet elle permet de percevoir toutes transformations indésirables s'opérant sur la surface, comme des micros-fissures¹⁰³.

Par ailleurs, un dispositif EDS associé au MEB m'a également permis de procéder à une micro-analyse élémentaire des échantillons, de quoi confirmer dans un premier temps la nature organique¹⁰⁴ du matériau mais également d'identifier la présence de charges inorganiques utilisées pour améliorer les propriétés du matériau¹⁰⁵. C'est le cas des mousses C1 et B (échantillon TI.05.15 et TI.06.15), dont les tests pH par pyrolyse avaient déjà émis l'hypothèse de la présence de composés inorganiques en quantité importante. Cela s'est caractérisé sur le spectre par la présence d'un pic sur l'élément aluminium (Al) bien distinct en plus des pics carbone et d'oxygène propres aux matériaux de nature organique. Le chimiste en chef du laboratoire ©Labtox, où se sont réalisés les examens au MEB et EDS, confirme l'idée qu'il puisse s'agir d'un colorant ou d'un autre additif visant à améliorer le comportement du matériau¹⁰⁶.

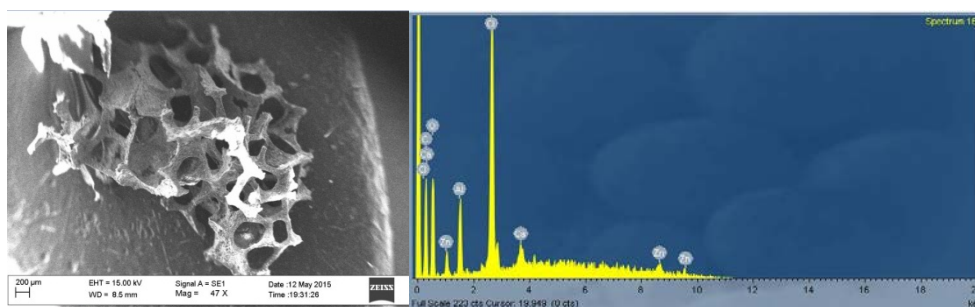


Figure 20 Echantillon TI.05.15 vu sous MEB et spectre EDS associé

2.2.5 Analyse FTIR

Pour rappel, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique d'analyse d'ordre moléculaire, visant à identifier les fonctions chimiques du matériau en présence¹⁰⁷. Par comparaison des spectres obtenus avec des références contenues sur une base de données informatisées, elle permet d'identifier de manière précise la nature de l'échantillon analysé¹⁰⁸.

L'analyse FTIR s'est effectuée en fin de campagne d'identification et était avant tout destinée à venir valider les résultats et observations obtenus par les techniques précédentes. De plus, cette analyse permet de révéler si la mousse de PUR présumée est de type ester ou éther.

¹⁰² Si les moyens financiers et techniques le permettent, on peut imaginer que cette technique pourrait être extrapolée pour le suivi des méthodes de conservation proposées. Le suivi de l'évolution de la microstructure de l'échantillon testé pourrait être un critère d'évaluation de l'efficacité des méthodes proposées.

¹⁰³ Pellizzi, 2012, p.18

¹⁰⁴ Spectres obtenus, composés de pics de carbone (C) et d'oxygène (O) caractéristique des matériaux organiques.

¹⁰⁵ Le détail des analyses EDS est à consulter en *annexe 17, p.57-60*.

¹⁰⁶ Gueniat, 2015, entretien oral

¹⁰⁷ Biophy Research, 2012 [en ligne]

¹⁰⁸ Son principe de fonctionnement est détaillé en *annexe 18, p.61-66*.

La comparaison des différents spectres obtenus avec ceux de références (disponibles dans la base de données informatiques) est venue confirmer que le rembourrage des sièges était bel et bien de la mousse de polyuréthane et plus précisément de type éther. De plus, l'analyse a révélé que le type et la quantité d'additif ajoutés au produit peuvent avoir leur influence dans la manière dont le matériau se dégrade¹⁰⁹.

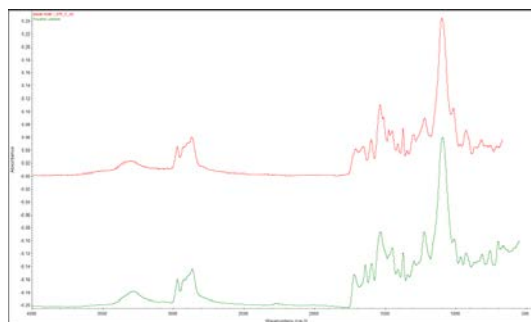


Figure 21 Spectre FTIR caractéristique des mousses PUR éther

L'analyse FTIR vient donc confirmer la pertinence et l'adéquation des techniques d'identification plus abordables préconisées précédemment, qui peuvent être aisément reproduites au sein de tous contextes muséaux.

Pour des raisons de coûts et de disponibilité de l'appareillage¹¹⁰, tous les échantillons prélevés n'ont pas été analysés, seuls les cinq jugés les plus représentatifs du rembourrage des sièges en ont bénéficié. Par ailleurs, par raisonnement, il aurait été superflu d'en analyser davantage. En effet, il faut partir du principe que les polymères de synthèses sont produits et mis en forme de manière à réaliser un maximum de profit aux fabricants. C'est pourquoi ces derniers utilisent, dans les limites du possible, les matériaux les moins chers pour remplir leur cahier des charges (la mousse PUR de type éther étant connue pour cela) et si possible le même type pour les compositions dont ils ont la charge¹¹¹ (ce qui leur permet un meilleur prix de revient). Au regard de l'ensemble des autres tests effectués et sur la base de ce raisonnement on peut donc en déduire que toutes les mousses identifiées *in situ* sont de même nature¹¹².

2.3 La mousse de polyuréthane

La conservation d'un matériau ne doit pas impliquer uniquement la préservation de sa matérialité mais aussi de l'ensemble des informations implicites et explicites dont il est la source. L'étape de documentation du matériau s'inscrit donc comme cruciale dans tout projet de conservation à long terme qui se veut respectueux de l'ensemble des valeurs de l'objet.

Le contexte de création, les domaines d'applications ou encore les méthodes de mises en œuvre, comme on a pu le voir précédemment, peuvent servir à identifier ou confirmer la nature du matériau en présence. Raison pour laquelle il est légitime de les aborder plus en détails. Par ailleurs, connaître

¹⁰⁹ Le détail des observations et des résultats obtenus est à consulter en *annexe 18, p.61-66*

¹¹⁰ Le coût d'analyse est de 110.-/h. pour une personne externe. L'analyse des 6 échantillons a pris plus de 2h, soit environs Fr. 250. Brambilla, 2015, *entretien oral*

¹¹¹ Quye et Williamson, 1999, p.62-63

¹¹² Pour preuve du bienfondé du propos, même la mousse la plus différenciable (qui ne fait pas partie de la composition du rembourrage), soit celle rigide de type (I), a été analysée comme une mousse de PUR éther.

les facteurs de dégradations permet de les anticiper et ainsi de mettre en place des stratégies optimales de conservation à long terme.

2.3.1 Contexte de création (historique, économique,...)

Pour remonter aux origines de la mousse de polyuréthane, il faut se replonger aux cours des années 30. Le caoutchouc, polymère de synthèse prédominant sur le marché et utilisé pour de nombreuses applications, devient de plus en plus coûteux et difficilement accessible à l'approche de la guerre¹¹³. Il est alors indispensable de produire un matériau de substitution aussi polyvalent, voire meilleur. C'est alors qu'Otto Bayer, chimiste et industriel allemand, tente de remédier à cette problématique en s'appuyant sur les travaux de Charles Adolphe Wurtz, ancien chimiste français ayant découvert la réaction uréthane en 1849. Dès 1937, Bayer et ses associés commencent à développer de nouveaux polymères basés sur la polymérisation des isocyanates. Au début, il s'agit de matériaux linéaires, puis les recherches et l'intérêt des chercheurs s'accroissent en Europe mais également aux Etats-Unis autour de la réaction d'expansion produite par l'eau au contact de l'isocyanate, observée lors des premières expérimentations¹¹⁴ et qui permettent de réaliser des mousses souples et rigides. C'est au début des années 50 que la société Bayer AG basée à Leverkusen (du nom de son célèbre directeur de recherches) commence à produire leurs premières mousses souples de polyuréthane de type ester, technologie qui ne tarde pas à s'exporter et à se commercialiser sur le sol américain. Fort d'un développement constant de ses procédés de fabrication, notamment la mise au point du one-shot¹¹⁵, les mousses sont produites à plus grande échelle et commencent à prendre une place prépondérante sur le marché. De plus, la fin des années 60 voit l'arrivée des mousses souples de type éther (basé sur un polyéther-polyol), qui présentent une meilleure élasticité. Bien que les techniques de mise en œuvre aient été en constante évolution depuis leur production, ces mousses hautes résiliences ont été et continuent d'être aujourd'hui les plus utilisées, non seulement pour leur souplesse mais également pour leur faible coût d'achat (90% des mousses que l'on retrouve aujourd'hui sur le marché sont de type éther)¹¹⁶.

2.3.2 Domaines d'application

Dès sa conception, l'utilisation de la mousse de polyuréthane s'est répandue dans de très nombreux domaines, aussi bien dans le secteur industriel qu'artisanal. Ainsi on la retrouve principalement dans l'ameublement (canapés, garnitures de chaises), l'automobile et l'aéronautique (notamment comme rembourrage de sièges et dans la conception de pneus increvables), les éléments de literie (matelas, coussins), les jouets, l'emballage et autres procédés de conditionnement, les articles de sport (notamment dans la composition des chaussures) et autres vêtements du quotidien (comme doublure)

¹¹³ a.ISOPA, 2015 [en ligne]

¹¹⁴Techniques de l'ingénieur, 2014 [en ligne]

¹¹⁵ Pellizzi, 2012, p.11-12

¹¹⁶ Gold, 2004, p.27-28

mais aussi dans de nombreuses créations design et sculptures¹¹⁷ ! Les champs sont si vastes qu'ils font du polyuréthane le polymère le plus utilisé pour fabriquer de la mousse¹¹⁸. C'est dans la conception des sièges, plus précisément comme matériau de rembourrage que la mousse PUR éther a imposé, dès les années 60, sa suprématie et ceci grâce à sa facilité de mise en forme, à son prix très avantageux, à sa vaste gamme de densité, de couleurs et d'épaisseurs mais surtout pour ses qualités d'assise et son confort reconnu de tous¹¹⁹. Dans le domaine des transports, la mousse souple de polyuréthane vient remplacer les rembourrages des sièges de train, d'automobiles et d'avions, étant pour la plupart garnis de mousse de latex* (jusque dans les années 30) et plus anciennement encore de fibres animales (crin de cheval,..) et même végétales (paille).



Figure 22 Evolution des sièges d'avion (Deutsches Technikmuseum)

Une des particularités premières recherchées dans le secteur aéronautique et dans la conception des avions est la légèreté de ses composants¹²⁰ (économie d'énergie et meilleure portance de l'appareil), raisons pour lesquelles la mousse de PUR fut très appréciée, surtout pour les avions de lignes qui comptent plus d'une centaine de sièges. Plus spécifiquement aux mousses PUR rigides, ces dernières sont avant tout utilisées comme panneau d'isolation dans le domaine du bâtiment. Depuis les années 40, on la retrouve fréquemment dans la conception du fuselage des avions¹²¹.

2.3.3 Synthèse du polymère

La synthèse du polyuréthane résulte d'une réaction de polycondensation entre des isocyanates et des polyols (alcools)¹²². L'incorporation d'un agent d'expansion au procédé permet d'obtenir des mousses plus ou moins souples selon les réactifs de base utilisés.

¹¹⁷ Ashby et Johnson, 2002, p.201

¹¹⁸ Szycher, 1999, p.4-6

¹¹⁹ A la lecture de ces propos, on peut voir que la différenciation entre une mousse de type éther ou ester peut également être faite sur la base du domaine ou type d'objet en présence. Dans le secteur du rembourrage de sièges, c'est bien la mousse PUR éther qui est utilisée. Celle de type ester apparaît davantage dans la confection de textiles et comme matériaux de conditionnement. Gold, 2004, p.35-36.

¹²⁰ Dubost, 2014, p.112

¹²¹ b. ISOPA, 2015 [en ligne]

¹²² Trotignon *et al.*, 1998, p.125

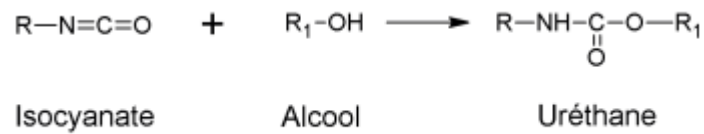


Figure 23 Réaction de synthèse de l'uréthane

Isocyanates

La fonction isocyanate ($-\text{N}=\text{C}=\text{O}$) avec ses deux double liaisons est particulièrement réactive¹²³ et s'additionne avec les groupes hydroxyles (OH) du polyol pour créer des polyuréthanes. Ceci s'accompagne également par la formation d'eau (d'où la désignation de réaction de polycondensation). Les plus utilisés présentent une structure aromatique, ce sont les isomères du diisocyanate de toluène (TDI), qui procurent une bonne résistance à la déchirure et le diisocyanate de diphenylméthylène (MDI) qui se retrouve le plus souvent dans la composition des mousses rigides. Les mousses compilant haute résilience et élasticité utilisent un mélange de TDI et de MDI¹²⁴.

Les isocyanates de type aliphatiques sont utilisés pour des vernis ou pour d'autres applications nécessitant une grande résistance à la lumière. Mais leur coût très élevé et leur grande toxicité limite grandement leur emploi¹²⁵.

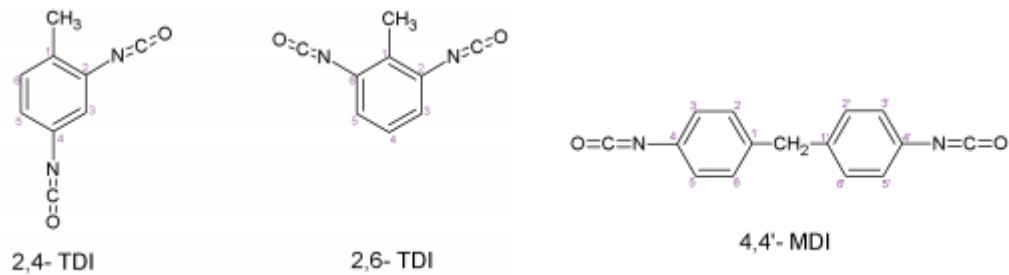


Figure 24 Le TDI et le MDI sont les isocyanates les plus courants

Polyols

Les polyols possèdent des fonctions hydroxyles réagissant avec les groupes isocyanates. Un polyol est caractérisé par la nature de ses constituants, son poids moléculaire (chaînes courtes ou longues) et sa fonctionnalité (nombre de liaisons actives pour la réticulation). Avec de longues chaînes (polyols à haut poids moléculaire), les liaisons ou ponts entre chaînes seront espacés ce qui donnera de la souplesse au produit. En revanche avec des chaînes courtes (polyol à bas poids moléculaire) les ponts seront très rapprochés rendant ainsi le polymère rigide¹²⁶. Au niveau de la fonctionnalité, plus le

¹²³ Trotignon *et al.*, 1998, p.125

¹²⁴ Pellizzi, 2012, p.6

¹²⁵ Gold, 2004, p.29

¹²⁶ Gold, 2004, p.29 et Pellizzi, 2012, p.9

nombre de liaisons actives dans la réticulation (groupes hydroxyles) au sein du polyol sera élevé, plus le produit final sera dur.

Deux types de polyols sont principalement utilisés dans la synthèse de mousse de polyuréthane : les polyéthers et les polyesters.

Polyester

Les polyesters sont principalement produits par polycondensation d'un diol et d'un diacide¹²⁷. Les polyesters coûtent plus chers que les polyéthers. Ils offrent une bonne tenue aux hydrocarbures et aux huiles ainsi qu'une résistance à la traction, à la flexion et à l'abrasion élevée. Par contre, ils présentent une résistance moindre à l'hydrolyse*¹²⁸.

Polyéther

Les polyéthers représentent la majorité de la production (près de 90%) et sont issus de la réaction d'oxydes d'éthylène et de propylène sur un polyol initiateur¹²⁹. Parmi les plus utilisés on peut citer les glycols (polyéthylène glycol, polypropylène glycol). Les polyol polyéther donnent des produits plus élastiques et sont moins sensibles aux facteurs thermohygro-métriques¹³⁰.

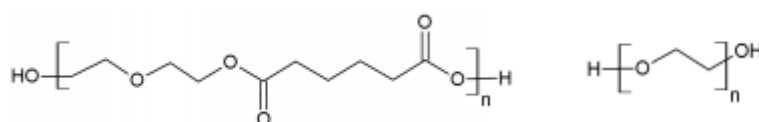


Figure 25 Polyol polyester (à gauche) et polyéthylène glycol (à droite)

Agents d'expansions

L'obtention de matériaux alvéolaires telle la mousse, nécessite un dégagement gazeux au sein de la réaction de polycondensation. Pour cela on peut procéder par voie chimique, avec l'utilisation d'eau qui réagit avec l'isocyanate en dégageant du CO₂, ou par voie physique en ayant recours à des liquides à bas point d'ébullition, comme les hydrofluoroalcanes¹³¹, qui se volatilisent sous l'action thermique. Le dégagement de CO₂ par utilisation d'eau comme agent d'expansion, s'accompagne également de la production d'amines qui ont tendance à durcir la mousse¹³² (par formation de liaisons urées). Raison pour laquelle on préférera le second procédé pour la création des mousses les plus souples.

¹²⁷ Poliuretanos, 2012 [en ligne]

¹²⁸ Foam Factory, 2011 [en ligne]

¹²⁹ La fonctionnalité des polyéthers-polyols peut atteindre 8 liaisons actives dans la réticulation. Pellizzi, 2012, p.6

¹³⁰ Foam Factory, 2011 [en ligne]

¹³¹ Les premiers agents gonflants (comme le trichlorofluorométhane ou Fréon 11) jugés trop dégradant pour l'environnement seront retirés dans les années 80. Depuis lors on essaie encore de trouver le produit idéal dans les hydrofluoroalcanes, qui sont toujours en phase d'expérimentation. C'est pourquoi on a recours aujourd'hui majoritairement à l'eau, le CO₂ et autres hydrocarbures. Techtendance (2002).

¹³² Trotignon *et al.*, 1998, p.125

Autres adjuvants

Des allongeurs de chaînes se retrouvent également dans la synthèse des polyuréthanes. Ce sont des amines qui permettent des extensions de chaînes ou des réticulations mais qui s'avèrent être particulièrement toxiques. Des catalyseurs visant à accélérer la vitesse de réaction entre l'isocyanate et l'eau et des agents tensio-actifs (silicone) permettant d'éviter à la mousse de retomber durant la phase d'expansion et favorisant la formation de cellules régulières, sont également utilisés¹³³. Parmi les autres adjuvants susceptibles d'être retrouvés dans la composition des mousses de polyuréthane, on peut citer : des agents ignifugeants*, des colorants¹³⁴, des matériaux recyclés, de même nature, des agents antistatiques ou encore des charges minérales telles que le dioxyde de titane ou le noir de charbon qui permettent, entre autre, de prévenir la dégradation du matériau par les UV et de masquer le jaunissement¹³⁵.

2.3.4 Technologie de mise en œuvre

La fabrication de la mousse souple de polyuréthane se déroule en deux étapes : la formulation du matériau puis sa mise en œuvre à proprement parlé.

Méthodes de formulation

La formulation de la mousse s'opère généralement de deux manières, à savoir la méthode du « One shot » ou la méthode « Pré-polymère »¹³⁶.

La première consiste à mélanger simultanément l'ensemble des composants du matériau (isocyanates, polyols et adjuvants). L'intérêt principal de cette méthode est qu'elle se déroule rapidement et ne nécessite pas d'intervention complémentaire pour finaliser le mélange, ce qui la rend très avantageuse au niveau des coûts de production. En revanche, ce procédé peut donner lieu plus facilement à des interactions indésirables entre les composants, ce qui limite le nombre de composants pouvant être utilisés. De plus, la réaction est particulièrement exothermique et si elle n'est pas adéquatement contrôlée elle peut entraîner des anomalies structurelles. La méthode du « one shot » est davantage appréciée pour sa capacité à produire de grandes quantités de mousse que pour la qualité du produit final¹³⁷.

La méthode dite « Pré-polymère » est la plus utilisée pour la formulation de la mousse de polyuréthane et a été développée dans le but de palier aux différentes anomalies du « one shot ». Elle fait réagir initialement uniquement les polyols et les isocyanates pour donner naissance à un pré-polymère. Ce n'est qu'après la formation de ce dernier que les colorants, agents moussants et autres

¹³³ Trotignon *et al.*, 1998, p.126

¹³⁴ Le code de couleurs des mousses PUR est à consulter en *annexe 19, p.67*.

¹³⁵ Gold, 2004, p.32

¹³⁶ Pellizzi, 2012, p.11-13

¹³⁷ Pellizzi, 2012, p.11-12

additifs sont rajoutés. Ce procédé permet un contrôle plus précis des caractéristiques du matériau durant toute l'opération et de former des produits finaux très homogènes et réguliers¹³⁸.

Méthodes de mise en œuvre

Une fois la résine liquide du polymère créée, l'étape du formage peut débuter. Les procédés les plus couramment utilisés sont le moulage par injection RIM¹³⁹ et la coulée souple.

Le procédé RIM est utilisé depuis les années 50 et a connu un essor important au cours des années 70, ceci est dû en grande partie au développement des thermodurcissables, notamment le polyuréthane. La résine, contenue dans la tête doseuse de la machine mélangeuse est injectée à haute pression dans des séries de moules métalliques avant que ces derniers ne soient refermés puis envoyés en étuve (15 minutes à environ 200°C)¹⁴⁰. La réaction d'expansion se fait presque simultanément, puis la forme en mousse ainsi obtenue peut être démoulée. Cette dernière est ensuite laissée « mûrir » pendant un jour, étape essentielle pour finaliser sa polymérisation. Cette méthode est surtout utilisée pour produire des mousses identiques en grande série, avec un certain niveau de détails et selon un large panel de couleurs, qualité et forme de base, qui se retrouvent comme matériau de rembourrage de sièges de véhicules ou comme autre élément de mobilier¹⁴¹. Le seul inconvénient avec cette technique est qu'une fois la mousse mise au repos, elle a tendance à se rétracter pouvant ainsi provoquer quelque irrégularité structurelle.

Concernant la mise en forme par coulée souple, elle permet aussi bien la confection de mousses souples que rigides. Le produit final, sous forme de grands blocs, présente une structure plus homogène que celle obtenue par RIM. La résine liquide est projetée par la tête d'injection sur une courroie transporteuse, recouverte de papier siliconé. Cette dépose nécessite d'être faite rapidement, puisque l'expansion de la matière s'effectue simultanément (risque de boucher l'injecteur). L'expansion du matériau s'effectue librement au fur et à mesure que la courroie progresse (épaisseur n'excédant pas 1m) avant que la mousse ne finisse par être débitée en blocs de manière continue¹⁴². Les blocs sont également mis à « mûrir » pendant 24 heures avant d'être transformés en blocs de dimensions diverses, servant essentiellement à la confection de matelas, d'éléments de literie, des matériaux de conditionnement ou encore des panneaux d'isolation (dans le cas des mousses rigides)¹⁴³.

¹³⁸ Pellizzi, 2012, p.12

¹³⁹ *Reaction Injection Molding*. Ashby et Johnson, 2002, p.240

¹⁴⁰ Trotignon *et al.*, 1998, p.128

¹⁴¹ Thompson, 2013, p.30-33

¹⁴² Trotignon *et al.*, 1998, p.128 et Gold, 2004, p.33-34

¹⁴³ Pellizzi, 2012, p.13

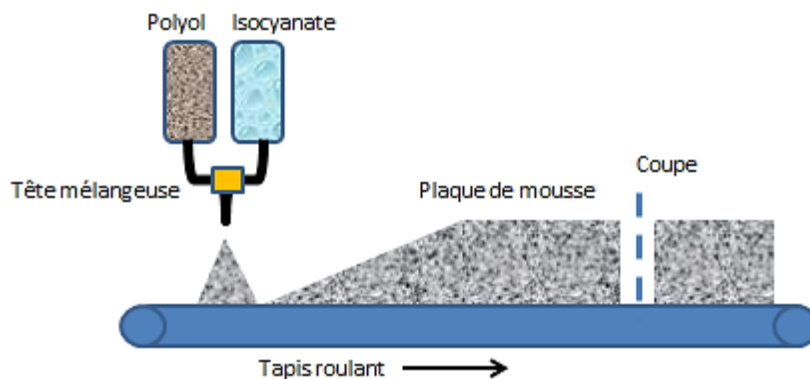


Figure 26 Méthode de mise en œuvre par coulée souple

Un tableau récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques de la mousse PUR éther est présent en annexe 20, p.67.

2.3.5 Facteurs de dégradation et effets sur les propriétés du matériau

Longtemps connus pour être des matériaux indestructibles, les polymères de synthèse s'affichent aujourd'hui, pour les responsables des collections patrimoniales, comme un des groupes de matériaux les moins résistants aux phénomènes de dégradation. De plus, au sein de ce même groupe, les mousses de polyuréthanes sont connues depuis plusieurs années comme étant les polymères les plus problématiques d'un point de vue de la conservation, tant par leur abondance au sein des collections contemporaines que par leur instabilité physico-chimique sur le long terme. Tout au long de leur vieillissement, des modifications irréversibles de ces propriétés peuvent être observées, dégradations qui peuvent mener à la mise hors service du matériau et précipiter leur remplacement¹⁴⁴.

Connaître et comprendre les processus de dégradation/vieillessement de la mousse de polyuréthane est essentiel pour proposer des méthodes de conservation adaptées pour le long terme. Le principe général de la conservation préventive des objets patrimoniaux et des matériaux qui lui sont associés est de s'attaquer à la source du problème soit, endiguer et agir sur les facteurs d'altération internes et environnementaux.

Facteurs environnementaux

Les facteurs climatiques sont à l'origine des principaux processus de dégradation des mousses polyuréthane. Le couplage entre photodégradation et oxydation (la dégradation photochimique)¹⁴⁵ est la source d'altération majeure du matériau.

¹⁴⁴ Mercier et al., 1999, p.236

¹⁴⁵ Mercier et al., 1999, p.445

Lumière

Le polyuréthane est particulièrement sensible à l'irradiation lumineuse. Les UV* contenus dans la lumière du jour, caractérisés par des longueurs d'ondes courtes, sont très énergétiques et provoquent la photoxydation de la mousse de polyuréthane. Les groupes d'atomes dits chromophores du matériau absorbent ce rayonnement. La désexcitation de cet état va mener à la formation de radicaux libres, composés chimiques très réactifs, qui peuvent être à l'origine d'une variation des propriétés mécaniques de la mousse et de la création d'un réseau de microfissurations superficielles¹⁴⁶, mais aussi des processus de réticulation, autrement dit la formation de nouvelles liaisons covalentes entre chaînes macromolécules, provoquant un durcissement de la mousse. Par ailleurs, les IR peuvent engendrer une élévation de température au sein du matériau, accélérant ainsi les processus de dégradation¹⁴⁷. Enfin, l'absorption du rayonnement visible par les colorants ou autres additifs présents à l'intérieur du matériau (anti-jaunissement, ignifugeant,..) peut contribuer grandement à la décoloration de la mousse¹⁴⁸.



Figure 27 Décoloration et perte des propriétés mécaniques de la mousse

Oxygène

Les radicaux libres, issus des phénomènes de photoxydation de la mousse, réagissent avec l'oxygène contenu dans l'air pour former des radicaux secondaires nommés peroxydes¹⁴⁹. Ces derniers sont à l'origine des phénomènes de peroxydation continus, induisant la fragmentation progressive des chaînes intramoléculaires et la création continue de produits d'oxydation (formate et aldéhyde)¹⁵⁰.

Humidité- Eau

Du fait de la grande polarité des molécules d'eau (état gazeux ou liquide) ces dernières créent des liaisons avec les autres composés polaires de la mousse, pouvant aboutir à plus ou moins long terme, sur un processus d'hydrolyse conduisant à la scission des chaînes macromolécules constitutives et donc à une perte de cohésion générale du matériau (délitement)¹⁵¹. De plus, une humidité trop élevée (au-dessus de 60%) favorise l'altération de la mousse par les polluants* acides atmosphériques et le développement de moisissures. Enfin, dans une moindre mesure, une humidité instable (+/- 10% de

¹⁴⁶ C'est sur ces composés que les stabilisants entrant dans la composition des mousses PUR (antioxydants, stabilisants UV) agissent, soit en inhibant leur formation soit en les détruisant. Le plus connu des antioxydants est l'ionol. Mercier et *al.*, 1999, p.449

¹⁴⁷ Thomson, 1986, p.190-191

¹⁴⁸ Schaeffer, 2001, p.77

¹⁴⁹ Wiles, 1993, 107-108

¹⁵⁰ Voir processus thermo-oxydation Pellizzi, 2012, p.15 et . Mercier et *al.*, 1999, p.446

¹⁵¹ En anglais on parle de phénomène de *crumbling*. Shashoua, 2006, p. 204-205

variations d'humidité journalière) peut provoquer des mouvements dimensionnels différentiels de la mousse (gonflement et rétraction) engendrant notamment des fissures¹⁵².

Température

Une température trop élevée (+25°C¹⁵³) n'a pas une action dégradante directe sur la mousse, mais elle augmente la vitesse des processus de dégradation chimiques¹⁵⁴, notamment la propagation de l'oxygène au sein du matériau (favorise la peroxydation). De manière plus précise, l'énergie conférée par la chaleur fait perdre un atome d'hydrogène au carbone. Le radical ainsi formé se transforme en radical peroxyde au contact de l'oxygène, amorçant ainsi sa dégradation par thermo-oxydation¹⁵⁵. Ainsi, une température élevée participe activement aux phénomènes de durcissement, fendillement pulvérulence, de liquéfaction ainsi qu'à l'altération des couleurs et de fragilisation générale de la mousse¹⁵⁶.



Figure 28 Délitement de la mousse entraînant d'importantes zones lacunaires

Polluants

Le dioxyde de soufre (SO₂), d'azote (NO₂) ou encore l'ozone (O₃) que l'on retrouve dans l'atmosphère peuvent participer, en concentration élevée, à la dégradation chimique acide du matériau¹⁵⁷ (changement de couleur et des propriétés mécaniques, dégradation de la structure cellulaire). L'avion étant conservé en plein air, leur prise en considération est d'autant plus importante que dans le cas d'objets contenus dans des réserves muséales. De plus, la présence de poussières en surface des sièges constitue des sites hygroscopiques* pouvant induire potentiellement des réactions d'hydrolyse et favoriser l'apparition de micro-organismes¹⁵⁸.

Dégradation anthropique

Les contraintes mécaniques régulières entraînées par l'utilisation des sièges par les passagers/visiteurs peuvent être à l'origine de dégradations structurelles irréversibles et d'une usure¹⁵⁹ précoce (déformation, abrasion, déchirures,...). Ces modifications de l'état structurel fragilise le matériau (état de fatigue avancé du matériau) et le rend davantage sensible aux autres facteurs de dégradations

¹⁵² Ramel, 2007 [en ligne], p.6 et Mttc et OCIM, 2002, p.66

¹⁵³ Ramel, 2007 [en ligne], p.6

¹⁵⁴ Une dégradation chimique débute le plus souvent avec une décoloration du matériau suivi d'une perte des propriétés mécaniques, Coles, 2009, p. 128.

¹⁵⁵ Pellizzi, 2012, p.15

¹⁵⁶ Mttc et OCIM, 2002, p.66

¹⁵⁷ Au contact de l'eau (gaz ou liquide), les substances acides que représentent les polluants atmosphériques se transforment en acide fort, particulièrement dégradant d'un point de vue chimique pour le matériau. Williams, 1997, p.3-4

¹⁵⁸ Mttc et OCIM, 2002, p.56

¹⁵⁹ Ashby et Jones, 1991, p.210-214

environnementaux. De plus, les visiteurs dégagent du CO₂ en respirant, qui agit sur la mousse au même titre que les polluants précités, et sont aussi porteurs de quantités de bactéries qui peuvent accélérer les processus de détérioration, surtout si l'affluence journalière au sein de la cabine est importante¹⁶⁰.

Dégradation biologique

La mousse de polyuréthane est, dans une moindre mesure, sujette aux attaques par les micro-organismes et autres moisissures (favorisées par des températures et une humidité relative élevées) friandes de matières organiques¹⁶¹. En plus de micro-lacunes, les déchets dus au métabolisme de ces derniers peuvent laisser des taches sur la surface du matériau¹⁶². Plus spécifiquement au cas de la Caravelle 12, l'état des lieux m'a permis de mettre en évidence la présence d'insectes (cadavres de mouches et de scarabées, nids d'abeilles, d'oiseaux, fientes, pelotes de réjection), de rongeurs et même de mammifères plus imposants comme des chats. Des poils retrouvés sur la moquette et sur la housse des sièges et les propos recueillis par les professionnels des lieux confirment ces suppositions. L'intrusion, facilitée par de nombreuses ouvertures du fuselage, notamment au niveau de la cabine de pilotage et la cohabitation de ces différentes espèces au sein de l'appareil, sont susceptibles d'altérer les éléments de la cabine, dont les mousses.

Facteurs internes

Certaines propriétés intrinsèques du matériau influencent la vitesse des processus de dégradation amorcés par les facteurs environnementaux. De manière générale, la mousse souple de polyuréthane étant constituée à plus de 95%¹⁶³ d'air, sa structure aussi bien interne qu'externe se trouve particulièrement exposée aux rayons lumineux (UV, IR), à l'eau (gaz et liquide) et à l'oxygène. Dans cette optique, la densité, la forme ou encore la taille sont des paramètres qui peuvent avoir leur influence quant au comportement du matériau sur le long terme. Le vieillissement plus ou moins rapide de la mousse peut également être influencé par la présence de stabilisants (stabilisateur d'UV, antioxydants, ignifugeant). Par ailleurs, au cours du vieillissement, les plastifiants utilisés pour abaisser la température de transition vitreuse du polymère lors de sa mise en œuvre, peuvent migrer à la surface ou encore s'évaporer, ce qui engendre une perte de souplesse de la mousse ou encore l'apparition de fissures.¹⁶⁴ Enfin, les mousses de polyuréthane elles-mêmes dégagent des composés organiques volatils (de nature azotée) en se dégradant¹⁶⁵. Un espace confiné comme celui présenté par la cabine de l'avion (et dans une moindre mesure la housse des sièges) peut engendrer une concentration importante de ces produits et donc provoquer une auto-dégradation du matériau. Ce

¹⁶⁰ Mtcc et OCIM, 2002, p.21

¹⁶¹ Crighton, 1988, p.18 et Mtcc et OCIM, 2002, p.13

¹⁶² Mtcc et OCIM, 2002, p.19

¹⁶³ Surface spécifique importante qui augmente, de manière générale, les interactions avec son environnement (phénomène d'absorption, adsorption...). Pellizzi, 2012, p.13

¹⁶⁴ Mercier et al., 1999, p.236

¹⁶⁵ Thomson, 1986, p.156

sont ces différents éléments qui conditionnent le vieillissement¹⁶⁶ naturel de la mousse, vieillissement qui peut être accéléré par tous les facteurs environnementaux précités.

3. Technique de retrait de la mousse endommagée

Avant de pouvoir proposer quelque traitement impliquant un remplacement de la mousse de rembourrage des sièges, il faut s'assurer que le démontage et le remontage des sièges (permettant d'avoir accès à la mousse) soit réalisable. Dans le cas des sièges passagers (confort et luxe), l'assise et le dossier ont été conçus pour être démontés facilement, ce qui minimise le risque d'endommager une de leur partie lors de l'opération de retrait de la mousse. Il en va de même pour les sièges Stewart et le tabouret de la cabine pilotes. En revanche, les sièges du pilote et du co-pilote présentent un assemblage davantage sophistiqué qui ne permet pas d'avoir accès à la mousse de rembourrage sans un traitement de restauration particulier.

3.1 Mesures sécuritaires et sanitaires

Le projet de retrait de la mousse endommagée ne doit pas prendre en compte uniquement une solution technique mais aussi l'application de mesures sanitaires, sécuritaires et organisationnelles.

De manière générale, la mousse de rembourrage est très pulvérulente, entraînant un nuage de poussières à chaque sollicitation des sièges. Ces dernières sont susceptibles de poser des problèmes respiratoires par leur inhalation ou ingestion mais également des allergies cutanées. De plus, les mousses dégagent une odeur quelque peu nauséabonde, perceptible même à quelques mètres des portes de la cabine, qui peut affecter les collaborateurs du musée après plusieurs heures passées à l'intérieur de la cabine. Cette odeur peut également être un signe de dégagement de COV toxiques et en dose considérable selon les spécialistes interrogés. L'espace confiné présenté par la cabine (effet de serre par temps ensoleillé), les odeurs d'urine et autres déchets présents rendent également les conditions de travail particulièrement difficiles à l'intérieur de l'appareil. Par ailleurs, la structure de l'avion ne présente pas de dégradations importantes, au point d'en empêcher l'accès. Pour améliorer les conditions de travail relatives au retrait de la mousse endommagée, plusieurs mesures d'ordre sanitaire et sécuritaire doivent donc nécessairement être prises.

Après un entretien avec M. Patrik Gerber¹⁶⁷, hygiéniste du travail pour le canton de Neuchâtel, il m'a été conseillé d'aborder cette problématique selon le principe «STOP» (substitution-technique-organisationnel-protection) établi par la Suva¹⁶⁸. Pour ce faire, une bonne connaissance de l'environnement de travail et des processus utilisés est nécessaire afin d'évaluer diverses stratégies de protection.

¹⁶⁶ La notion de vieillissement, qui n'est pas évidente de dissocier de la notion de dégradation, se veut de mettre en avant que, quel que soit les conditions dans lequel évolue le matériau, ce dernier subira naturellement des transformations, aussi bénignes soient-elles, par l'action du temps. Palissy, 1980, p. 288.

¹⁶⁷ Gerber, 2015, *entretien oral*

¹⁶⁸ Caisse Nationale Suisse d'Assurance en cas d'Accident. SUVA, 2015 [en ligne]

Le principe du STOP énumère les mesures à prendre pour protéger les collaborateurs contre les produits dangereux :

Tout d'abord il faut trouver si possible des moyens de substitution, autrement dit remplacer le matériau problématique par un autre ne présentant aucun danger d'un point de vue sécuritaire et sanitaire. Ce premier objectif pourra être atteint par la réalisation du projet de remplacement du rembourrage par une mousse plus stable et inerte d'un point de vue physico-chimique ou par sa consolidation, limitant ainsi les risques de dispersions de poussières, d'odeurs pestilentielle et de dégazage de COV dangereux pour la santé. La deuxième étape est la mise en œuvre de mesures techniques visant à capter, évacuer ou limiter les substances potentiellement dangereuses (ici les poussières/aérosols et éventuellement les odeurs) durant toute la période du travail. La troisième mesure à appliquer est d'ordre organisationnel. Le séjour dans l'espace présentant un risque d'exposition à des substances dangereuses doit être limité au maximum, tant d'un point de vue de la durée que du personnel chargé d'effectuer le travail¹⁶⁹. Enfin, la dernière disposition à prendre concerne l'équipement de protection individuel, nommé plus couramment EPI, qui doit être appliqué si l'instauration de toutes les mesures précédentes ne permet pas d'éviter complètement la libération de particules.

Les moyens de substitution ne pouvant contribuer à l'amélioration des conditions offerte par la cabine qu'une fois l'étape du remontage des sièges effectuée (remplacement des mousses¹⁷⁰), c'est donc sur les mesures de types techniques, organisationnelles et de protection individuelles qu'il faut agir.

Mesures techniques

La première mesure technique suggérée par M. Gerber est d'effectuer au maximum les étapes de retrait de la mousse en dehors de la cabine, par l'installation d'un dispositif d'aspiration à la source. Une paroi aspirante ou une hotte d'aspiration peut être utilisée, en veillant à ce que le collaborateur ne se retrouve pas dans l'axe objet/poussières – aspiration. Pour cela la paroi aspirante doit être placée perpendiculairement à l'objet ou poste de travail sur lequel le retrait se fait. Il faut également prévoir l'utilisation d'aspirateurs avec filtres absolus. Ces derniers permettront d'aspirer les poussières et autres dépôts exogènes présents à la surface des sièges avant le traitement (ce qui limite la dispersion de poussières durant le démontage) et à la fin de celui-ci (pour les poussières présentes sur le sol et sur l'ossature du siège). Les mesures sanitaires font partie d'un projet global considérant l'étape du retrait et anticipant également celle du remontage. Et justement pour que l'étape de retrait se fasse dans les meilleures conditions possibles (également dans l'optique d'accueillir le public), il est important qu'un nettoyage rigoureux se fasse, une fois l'étape de retrait du rembourrage terminée¹⁷¹. Pour ce faire, il faudra procéder à une aspiration sur le sol, sur les ossatures des sièges et sur tous les

¹⁶⁹ Negrini, 2014, *non publié*

¹⁷⁰ Il paraît évident que l'aspect sécuritaire/sanitaire doit également être considéré comme critère de choix de matériaux de substitution à la mousse actuelle (matériau ne dégazant pas de substances dangereuses (ou en quantité problématique) et limitant les risques d'incendie et de poussières).

¹⁷¹ Gerber, 2015, *entretien oral*

autres éléments ou parties annexes ayant pu être contaminées par les poussières (également prévoir le retrait mécanique des fragments de mousses collés à la structure des sièges¹⁷²). Le dépoussiérage des housses doit également être prévu avant l'étape du remontage.

Pour lutter contre la dispersion de poussières, il est également possible de sprayer la surface des sièges avec de l'eau¹⁷³ (pour autant que la mousse en question ne soit pas conservée).

Mesures organisationnelles

Afin de réduire le temps de travail au sein de la cabine, il faut tout entreprendre pour réaliser le maximum d'opérations en dehors de cette dernière. Par exemple, le déhousseage des coussins d'assise des sièges passagers, comme celui des coussins d'assise et de dossier des Stewart et du tabouret (cabine pilote) se pratique indépendamment de l'étape du retrait des coussins des sièges. De ce fait, cette étape de retrait peut s'effectuer à l'extérieur de la cabine, dans un espace plus adapté (local annexe avec plan de travail équipé d'un système d'aspiration¹⁷⁴), étant donnée la grande pulvérulence des mousses de rembourrage. Quel que soit l'espace utilisé pour effectuer le retrait de la mousse, ce dernier doit bénéficier d'un nettoyage complet en fin de traitement, pour éviter toute nouvelle contamination. Par ailleurs, pour améliorer les conditions de travail au sein de l'appareil, notamment au niveau des odeurs, il est recommandé d'ouvrir les différentes portes de l'avion de manière à créer une aération naturelle. De manière générale, chaque collaborateur doit impérativement être informé sur les dangers potentiels (risque d'inhalation de particules grossières voire fines, ...) et de l'importance d'appliquer les mesures de protection de la santé proposées¹⁷⁵.



Figure 29 Porte de secours situé à l'avant de l'appareil pouvant être ouverte

Équipement de protection individuelle (EPI)

L'EPI à s'y m'attendre, n'est pas la première mesure d'ordre sécuritaire et sanitaire à considérer. En effet, ce sont les mesures de types organisationnelles et techniques qui permettront d'avoir le plus grand impact sur le bon déroulement du traitement. Cette manière de faire permet de limiter l'équipement de sécurité à porter par les collaborateurs, qui peut s'avérer contraignant s'il est trop conséquent (les masques anti-poussières peuvent gêner la respiration, la chaleur et la transpiration amenées par les combinaisons). Néanmoins, l'EPI permet de pallier

¹⁷² Pour éviter d'abîmer la surface de la structure métallique, il suffit simplement de mouiller la mousse résiduelle collante avec de l'eau puis de gratter avec un racloir en bois (une plaquette de bois taillée en biseau fait l'affaire). Veiller à bien sécher la surface après l'opération.

¹⁷³ Seghairia, 2015, *échange courriel*

¹⁷⁴ Si la mise à disposition d'un local n'est pas envisageable, le déhousseage des sièges en plein air peut être envisagée moyennant bien entendu la prise de certaines mesures (installation de postes travail surélevé du sol et protégé par une tente si possible, permettant ainsi de préserver au maximum l'intégrité des housses et des échantillons de mousses choisis d'être conservés. Ne pas effectuer l'opération lors de conditions météorologiques inadéquates (averses, vents violents, soleil intense).

¹⁷⁵ Gerber, 2015, *entretien oral*

efficacement les lacunes des procédures placées en amont, lorsque le danger potentiel ne peut malheureusement être écarté complètement ou que des doutes persistent quant à la nature de certains matériaux ou substances en présence¹⁷⁶. Ces cas de figure sont fréquents selon l'hygiéniste interrogé, raison pour laquelle un EPI minimal mais efficace est presque systématiquement conseillé.

Comme le niveau de toxicité de la mousse n'est pas précisément connu à l'heure actuelle (l'hygiéniste interrogé suspecte le dégagement d'isocyanate, substance potentiellement toxique et allergisante) ni même la nature de certains matériaux constitutifs de la cabine (l'utilisation d'amiante a été révélée dans la fabrication de certains avions comme le Concorde¹⁷⁷), le port d'un EPI est donc rendu indispensable pour toutes les parties du corps exposées¹⁷⁸.

Le détail de l'EPI nécessaire pour le retrait des mousses de rembourrage est à consulter en *annexe 21, p.68-69*.

Autres mesures

D'autres mesures d'ordre sécuritaire doivent également être prises en compte dans le projet d'intervention, notamment la gestion et l'élimination des déchets provenant du retrait des mousses, mais également les qualités ignifugeantes dont doit faire preuve le matériau de remplacement.

Concernant l'élimination des mousses non-conservées, M. Gerber conseille de les placer dans un double sac poubelle, pour réduire au maximum les risques de contamination d'un autre espace¹⁷⁹. Il faut également prévoir des bennes de « matériaux inertes* » dans lesquelles l'ensemble des sacs seront placés. En attendant leur élimination (faire appel aux services d'une société spécialisée en la matière) les bennes doivent être stockées dans un local clos, fermé à clef pour éviter d'exposer les collaborateurs du musée à tous dangers potentiels. Pour information les mousses de types PUR sont le plus souvent incinérées dans des usines spécialisées dans le tri des déchets.

Pour la loi qui régit les exigences en matière de qualité ignifugeantes des matériaux utilisés dans le domaine public il est indispensable de se référer à la législation en vigueur dans le pays¹⁸⁰.

3.2 Limites des recommandations sécuritaires et sanitaires

Les mesures sécuritaires et sanitaires précitées se veulent des plus explicites par rapport aux informations dont le musée et moi-même disposons à l'heure actuelle sur l'avion, les mousses et les autres substances. Ce chapitre se voulant avant tout pour servir de base de travail. Il nécessitera d'être complété pour des raisons législatives et juridiques par un personnel qualifié et compétent en la matière. Comme me l'a mentionné M. Gerber, il serait vivement conseillé, voire indispensable que le musée prenne contact avec les organismes compétents et reconnus en matière de sécurité au

¹⁷⁶ Selon Seghairia, 2015, *échange courriel* et OMS, 2015 [en ligne].

¹⁷⁷ Héaulme, 2015 [en ligne].

¹⁷⁸ CDG 64, 2014, p.2-27.

¹⁷⁹ Gerber, 2015, *entretien oral*

¹⁸⁰ Officiel Prévention, 2014 [en ligne]

travail¹⁸¹ pour obtenir la conformité de l'intervention projetée. En effet, la situation actuelle nécessite de prendre en considération d'autres paramètres comme la quantité de poussières générées par rapport au seuil limite autorisé, la taille des particules, ou encore de faire une étude sur la qualité de l'air de l'intérieur de la cabine qui permette de déceler tous gaz toxiques ou en quantités problématiques¹⁸² qui nécessiteraient l'utilisation de masques munis de filtres anti-gaz. Pour cela, les organismes concernés procèdent le plus souvent à une série de tests sur place et en amont de toute intervention de manière à compléter la connaissance du milieu et valider ou modifier les mesures préétablies. De plus, la législation française peut différer de celle de la Suisse. C'est grâce à cette dernière que j'ai réussi à obtenir le plus d'informations. Notamment sur les doses maximales d'exposition tolérées, la gestion des déchets ou encore préciser les exigences en terme de qualité ignifugeantes des matériaux utilisés dans le domaine public, plus précisément au sein des institutions muséales. Ces éléments prennent toute leur importance surtout quand on sait que l'avion peut être amené, dans un avenir proche, à accueillir à nouveau du public.

Le détail des moyens logistiques inhérents au projet de retrait des mousses de rembourrage est à consulter en *annexe 22, p. 70-71*.

3.3 Protocole de retrait des mousses

Retrait de la mousse des sièges passagers

La mousse de rembourrage est maintenue à la structure métallique du siège et à leurs housses par un système de velcro. Bien que le démontage des assises et du dossier (parties indépendantes) puisse paraître facilement réalisable, il faut veiller à ne pas abîmer davantage les velcros (déjà particulièrement fragiles : décollement partiel, déchirures, perte du pouvoir d'adhésion) lors de l'opération, ni d'abîmer les housses de sièges qui seront conservées.

Protocole de retrait du rembourrage des sièges passagers

Le principe d'assemblage des sièges passagers (« Espace » et « Luxe ») est le même pour tous.

Assise : des sections de velcro sont placées en bordure du dessous de l'assise en mousse (les velcros ne sont pas collés directement sur la mousse mais sur un tissu brun clair (en lin) intermédiaire recouvrant cette dernière. Un velcro placé à l'avant et à l'arrière permet le maintien de l'assise à la toile de textile tendue au-dessus de la structure métallique du siège. Le rembourrage est maintenu dans sa housse par pression mais également par les autres velcros placés en périphérie. Par ailleurs, dans le cas d'un grand nombre de sièges, un, voire plusieurs velcros sont lacunaires.

¹⁸¹ Sur le territoire français ont fait appel à des « médecins du travail ». Gerber, 2015, *entretien oral*

¹⁸² Il est impératif de déterminer si l'odeur ressentie à l'intérieur de la cabine est seulement gênante d'un point de vue olfactif ou si elle est réellement dangereuse pour la santé.

Dossier : le rembourrage du dossier est maintenu dans sa housse par pression¹⁸³ et par deux lignes longitudinales de velcros placés de chaque côté de sa face avant. La mousse de rembourrage n'est pas directement assemblée à la structure métallique du siège. En effet, c'est la housse qui effectue cette liaison. Ainsi des velcros sont disposés tout le long de la périphérie de la housse et viennent s'assembler en bordure de l'arrière du siège. A noter également la présence d'une pochette placée dans la partie inférieure de l'arrière du siège et attachée par deux velcros (un placé sur le haut et l'autre dans le bas)¹⁸⁴.



Figure 30 Vues générales du siège passager

1. Retirer le coussin d'assise du siège: tirer délicatement l'assise vers le haut pour la désassembler des deux velcros qui la maintiennent au reste du siège.



Figure 31 1^{ère} étape du démontage : retirer l'assise du siège

2. Retirer la housse du rembourrage de l'assise : commencer par détacher le velcro avant (velcro placé au niveau du rabat) puis les côtés et enfin le velcro arrière. Une fois les velcros

¹⁸³ Le rembourrage se trouve comprimé entre la housse et la structure métallique du siège. La housse ne recouvre que l'avant des mousses, la face arrière de ces dernières sont en contact direct avec la structure métallique des sièges.

¹⁸⁴ Seule différence avec les sièges luxe mises à part les dimensions, c'est qu'il n'y a pas de plateau à l'arrière du dossier (on peut directement retirer le velcro!)

désassemblés, la housse est encore maintenue par pression de la mousse. Exercer alors une légère pression ou déformation sur la mousse et non pas sur la housse (risque de déchirure), puisque cette dernière sera conservée après intervention. Dans le cas où la mousse serait destinée à être conservée, maintenir délicatement une pression sur sa partie avant puis commencer par dégager cette partie de la housse avant de la retirer entièrement. De manière générale, une fois les velcros désassemblés, la mousse se retire facilement de sa housse (le pouvoir de pression exercée par cette dernière ayant diminué avec les années, la housse s'est distendue et la mousse s'est compressée, ce qui facilite l'opération)¹⁸⁵.



Figure 32 2^{ème} étape : retirer la housse de l'assise

3. Retirer le rembourrage du dossier:

Commencer par descendre la tablette présente à l'arrière du dossier, ceci permet un meilleur accès aux velcros. Désassembler l'ensemble des velcros présents sur tout le pourtour arrière du dossier qui permet la connexion entre la housse (avec le rembourrage) et le reste de la structure du siège. D'un point de vue ergonomique, le dossier peut être incliné vers l'avant, ce qui permet de disposer davantage de place et de réaliser l'opération dans une position convenable. En tirant le coussin du dossier par sa partie inférieure, ce dernier commence à se désassembler complètement du reste du siège. C'est à ce moment-là que la housse peut être retirée progressivement du bas vers le haut (en suivant les velcros)¹⁸⁶. C'est une fois la mousse enlevée complètement que la housse du dossier peut être retirée. Enfin, détacher la pochette.

¹⁸⁵ S'il s'avère malgré tout trop difficile de désassembler la housse d'une mousse, et que la priorité est mise sur la conservation de cette dernière, il faut prévoir de défaire une couture (mieux vaut cela qu'une déchirure du tissu).

¹⁸⁶ Du fait que le rembourrage du dossier se trouve comprimé entre l'assemblage de la housse à la structure du siège, l'étape du démontage du dossier et du déhousseage de ce dernier doivent s'opérer simultanément (impossibilité de procéder en deux étapes distinctes).



Figure 33 Descendre la tablette pour avoir plus facilement accès aux velcros



Figure 34 Retirer la housse du dossier en tirant la partie inférieure du coussin vers l'avant

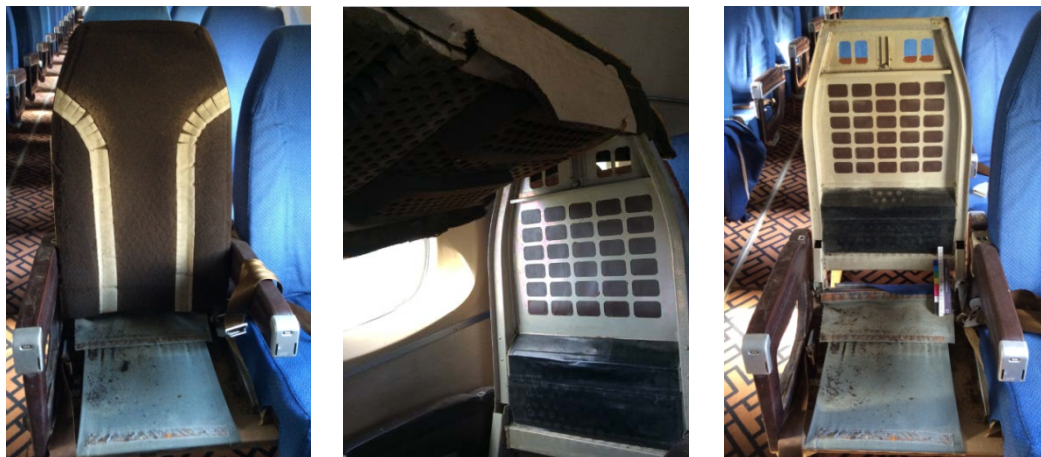


Figure 35 Une fois la housse retirée, la mousse peut être enlevée à son tour



A noter que le dossier des sièges passagers peut être incliné vers l'avant, ce qui peut aider à faciliter le travail de retrait. A part les échantillons de mousses qui seront retenus pour être conservés sur le long terme, les autres seront éliminés. Il est donc préférable de forcer (déformer) sur ces derniers pour faciliter l'étape du retrait et ainsi éviter de mettre sous tension les housses, qui seront conservées dans leur intégralité.

Le protocole de retrait des rembourrages des autres types de sièges est à consulter en *annexe 23*, p.72-77.

Par ailleurs, il est important de procéder au marquage des housses selon le numéro du siège associé, de manière à pouvoir conserver la configuration d'origine. Cette étape doit être réalisée systématiquement à la fin du traitement d'un siège. Pour ce faire, il faut utiliser des étiquettes (pas de marquage direct sur les housses¹⁸⁷!) portant le numéro du siège correspondant (éventuellement utiliser en préfixe la lettre **a** pour assise ou **d** pour dossier) inscrit au crayon de papier (évite le problème de dissolution des encres en cas de contact avec l'eau). Les recommandations de conservation des housses ne seront pas abordées dans ce travail, si ce n'est de prévoir de les dépoussiérer et de les placer, dans un premier temps, à l'intérieur de pochettes en PE (des sachets *Minigrip*[®] de grandes tailles existent sur le marché).

4. Propositions de méthodes de conservation à long terme

La conservation des matériaux constitutifs d'un bien culturel s'inscrit, au même titre que la documentation qui lui est rattachée, comme une étape indispensable d'un traitement de conservation-restauration qui se veut respectueux des valeurs de l'objet. Cela rend possible, dans le futur, toute nouvelle investigation sur le matériau, quand bien même ce dernier aura été remplacé.

¹⁸⁷ Reuss, 1997, p. 71-72

La littérature consultée sur le sujet fait état de traitement d'anoxie pour la conservation à long terme de mousse PUR¹⁸⁸, mais ne mentionne pas la mise en place d'autres méthodes de conservation spécifiquement appliquées pour ce type de matériau. Par ailleurs, les différents ouvrages présentent les facteurs sur lesquels il faut impérativement agir, le type de dégradation à anticiper et les généralités indispensables à respecter pour la conservation des matières « plastiques ». De plus, il est très souvent évoqué de traiter la mousse de PUR de la même façon que les objets en PVC¹⁸⁹, pour lesquels il existe de nombreuses applications en terme de méthode de conservation à long terme.

L'ensemble des méthodes proposées découle donc d'une réflexion globale basée sur les principaux facteurs de dégradations des mousses PUR¹⁹⁰, des principes de conservation à long terme connus des polymères de synthèses (notamment dans le cas du PUR et PVC) ainsi que des matériaux et produits recommandés dans le domaine de la conservation-restauration pour la mise en conservation à long terme. Cette réflexion se veut aussi de proposer des méthodes des plus complexes au plus basiques, mais qui présentent toutes un intérêt certain, la volonté du musée étant de disposer d'un certain choix.

Il faut donc bien prendre en compte le caractère expérimental des méthodes proposées, la littérature consultée ne faisant pas état de l'utilisation de la plupart d'entre elles pour de la mousse PUR éther. Il paraît donc indispensable que ces dernières soient testées en temps réel pour juger réellement de leur efficacité sur le long terme. C'est pourquoi un suivi de l'évolution des échantillons doit être fait de manière rigoureuse durant toute la période du test, à l'aide d'une fiche de suivi spécialement établie sur les propriétés du matériau et ses processus de dégradations¹⁹¹. Au-delà des qualités présentées par les fournisseurs et la littérature spécialisée pour chacune des méthodes mises en place, c'est le résultat de ce suivi qui sera le plus explicite et qui constituera une base solide pour désigner la méthode la plus adéquate à appliquer. La durée du suivi dépend de nombreux facteurs, soit de l'échéance fixée par le musée pour procéder au traitement des sièges mais également du comportement des différents échantillons¹⁹² (si certains montrent des signes de dégradations avancés dès les premiers mois, les méthodes associées peuvent être écartées). Par ailleurs, le choix de la méthode, par le musée, se fera sur la base des moyens financiers et humains dont il dispose, d'où l'importance de proposer également des solutions très abordables.

Comme le musée n'était à l'heure actuelle pas disposé à procéder à quelque prélèvement que ce soit (dépassant le cm) pour tester les différentes méthodes proposées et pour y remédier au mieux, je suis parvenu à récupérer sur un matelas d'un ancien lit pliable, un bloc de mousse PUR¹⁹³ dans lequel

¹⁸⁸ Shashoua, 2006, p. 209

¹⁸⁹ Coles, 2009, p. 129

¹⁹⁰ Un tableau récapitulatif des différents facteurs de dégradation et leurs effets sur la mousse PUR éther est à consulter *en annexe 24, p. 78*

¹⁹¹ La fiche de suivi des échantillons est à consulter *en annexe 25, p. 79-87*.

¹⁹² Ces deux facteurs ne peuvent à l'heure actuelle être connus, mais le suivi devrait au moins s'opérer sur une année.

¹⁹³ Ce bloc de mousse a bénéficié d'une analyse FTIR pour s'assurer qu'il s'agissait bien de mousse PUR éther.

J'ai découpé les échantillons tests. Ce dernier n'étant pas semblable en tout point au rembourrage des sièges, il présente malgré tout plusieurs similarités (plus de 20 ans d'âge ; a été enveloppé dans une housse textile, a été utilisé par de nombreuses personnes et il dégage une odeur similaire¹⁹⁴). Des propositions de protocoles de prélèvement de la mousse d'origine ont également été établies pour le musée qui pourra les mettre en œuvre en temps voulu¹⁹⁵.

Il en est de même des différentes méthodes mises en œuvre et qui sont à consulter en *annexe 27, p.91-100*.

4.1 Méthode 1 : Mise en anoxie

La première méthode de conservation à long terme proposée est une technique de mise en anoxie de l'échantillon, méthode d'assainissement initialement développée dans le secteur agroalimentaire, l'anoxie étant utilisée depuis les années 80 dans le domaine de la conservation-restauration, notamment comme traitement des objets organiques contaminés par des souches biologiques, par retrait de l'oxygène environnant¹⁹⁶.

Pour ce faire l'objet est placé dans une poche hermétique à l'oxygène avec des absorbeurs d'oxygène. Dans le cas des polymères de synthèses c'est avant tout l'exemption d'O₂ permise par cette technique qui est recherchée¹⁹⁷. Par ailleurs, en utilisant non seulement des produits capables de capter l'oxygène mais également d'adsorber des polluants et un contenant protégeant des UV, cette méthode permet de préserver la mousse de ses principaux agents destructeurs.

Dans le cas présent, une pochette de type *ESCAL*[®] semi-transparente (une face transparente et l'autre en aluminium) fermée hermétiquement (par thermo-soudage ou clips) est utilisée avec à l'intérieur un dispositif *RP-K System*[®], jouant le rôle d'adsorbeur d'oxygène et de polluants ainsi qu'un indicateur d'oxygène *Ageless Eye*^{® 198}. L'échantillon n'est pas directement placé dans le sachet mais dans une boîte en polypropylène (PP) rigide ouverte. Ceci permet d'éviter les contraintes physiques dues au colmatage des parois du sachet sur la mousse lorsque le vide se fera et d'éviter toutes interactions indésirables dues au contact direct de l'échantillon avec les différents sachets de produits utilisés. Les pochettes de type *ESCAL*[®] avec une face en aluminium permettent, par leur fraction en aluminium, d'abriter de manière efficace l'échantillon de la lumière tout en rendant possible son observation directe par la face transparente¹⁹⁹. Par ailleurs, l'absorption de l'oxygène permet également d'inhiber la dégradation des matériaux par les UV. En effet, les dégradations de types photochimiques associant action de l'oxygène et des UV (si l'un des deux facteurs est écarté), le processus ne peut être amorcé

¹⁹⁴ Une description détaillée de la mousse utilisée pour les tests est à consulter en *annexe 26, p.88-89*.

¹⁹⁵ Protocoles à consulter en *annexe 26, p.89-90*

¹⁹⁶ Maekawa, 1998, p.1, 7 et 8 et Selwitz et Maekawa, 1998, p.7

¹⁹⁷ 20, p.209

¹⁹⁸ Mitsubishi, 2014, p. 2-8

¹⁹⁹ Atlantis, 2012, p.1-3

ou du moins être considérablement réduit²⁰⁰. Raison pour laquelle il n'est pas nécessaire de protéger la faction transparente par une couche protectrice supplémentaire, un simple placement de la pochette dans un endroit sombre suffira pour assurer la préservation de l'échantillon.



Figure 37 Méthode 1 : résultat final

Pochette en film ESCAL® simple face aluminium

La face transparente de ces pochettes, en film ESCAL®, est constituée d'un assemblage de trois couches : une de PP, une de polyacétate de vinyle (PVA) et un dernier revêtement de PE. L'autre face de la pochette est un film aluminium A30T, également composé de plusieurs couches (polyéthylène téréphtalate, aluminium laminé et polyéthylène basse densité²⁰¹). Ces pochettes présentent d'excellentes propriétés de barrières à l'oxygène et à la vapeur d'eau et sont facilement thermosoudables (2 soudures sont nécessaires par côté pour assurer son efficacité). Des clips haute performance en PP (Azzurro-clips) peuvent également être utilisés pour sceller l'ouverture des pochettes. Combinés à des pochettes pré-conçue, cela évite à l'intervenant d'acquérir ou d'utiliser une thermosoudeuse²⁰². Pour les traitements d'anoxie sur le long terme, les fournisseurs spécialisés dans le domaine de la conservation-restauration préconisent ce type de pochettes. Ceci vient du fait qu'elles sont plus performantes (au niveau de leur imperméabilité à l'O₂ et à H₂O) que la majorité des autres types de films barrières que l'on peut retrouver sur le marché, comme le film transparent Ergoflex. Mon choix d'utiliser des pochettes avec une face aluminium et non complètement transparente a été fait pour plusieurs raisons. Malgré que l'étanchéité du film aluminium A30T soit très légèrement inférieure à son homologue transparent, il permet une barrière supplémentaire contre la lumière (UV) et est également moins cher²⁰³.

Le tableau ci-dessous compare les différentes caractéristiques (notamment les qualités d'imperméabilité aux gaz et à l'eau) de différents films barrières²⁰⁴.

Comparatif des caractéristiques	Film ESCAL® transparent	Film ESCAL® aluminium A30T	Film Ergoflex®
Épaisseur	112 µ	123 µ	80 µ
Perméabilité à O ₂ (23°C, 0%HR)	0.05 cm ³ /m ² /jour	0.01 cm ³ /m ² /jour	<3,5 cm ³ /m ² /jour

²⁰⁰Maekawa, 1998, p.8-9

²⁰¹ Les films complexes ou composites permettent d'associer les qualités de plusieurs matériaux, permettant ainsi d'obtenir des produits particulièrement performants et polyvalents. Atlantis, 2012, p.1-3

²⁰² L'efficacité des clips est similaire à une double thermo-soudure s'ils sont utilisés à température ambiante (25°C), mais elle a tendance à baisser à plus haute température. a. Atlantis, 2015 [en ligne]

²⁰³ Les pochettes semi-transparentes sont moins chères au prix de revient que celles en film ESCAL® entièrement transparentes. Waller, 2014 [en ligne].

²⁰⁴ Réalisé sur la base des documents suivants : Atlantis, 2012, p.1-3 et Waller, 2014 [en ligne].

Perméabilité à H ₂ O (40°C à 90% HR)	0.01 g/m ² /jour	<0.04 g/m ² /jour	<0.1 g/m ² /jour
Perméabilité à l'azote (23°C, 0%HR)	<0.04 g/m ² /jour	<0.1 g/m ² /jour	<1cm ³ /m ² /jour
Composition	PP/PVA/PE	PETB/Alu/LDPE	PE/HV/PA/EVOH/PA/PE
Prix (Atlantis-FR)	40 €/m ²	10 €/m ²	Environs 4 €/m ²

Système RP-K[®]

Développé par Mitsubishi Gas Chemical Compagny, les sachets *RP-K[®] System* ont spécialement été conçus pour prévenir la détérioration des objets de nature organique par adsorption de l'oxygène mais aussi de gaz corrosifs au sein de l'enceinte contenant l'objet²⁰⁵. Ils sont composés de poudre d'oxydes de fer, de charbon actif et des oxydes de calcium (ou « chaux-vive»). Les particules ferreuses réagissent avec l'oxygène pour former de nouveaux oxydes ou des hydroxydes de fer²⁰⁶. La combinaison de charbon actif et de chaux-vive va adsorber le CO₂, SO₂, HCL et le HN₃, principaux polluants impliqués dans les phénomènes de dégradation des matériaux (aussi bien organique qu'inorganique). Ces deux réactions vont permettre d'obtenir un volume quasiment exempt d'oxygène et de gaz corrosifs et protégeant des contaminations/proliférations biologiques. Même s'il n'y pas de sorbants* à l'intérieur des sachets *RP-K[®]* (contrairement aux sachets *RP-A[®]*), conçus pour les objets en alliage métalliques) la mise en anoxie (système imperméable à H₂O) participe au maintien d'une hygrométrie stable à l'intérieur du conditionnement.²⁰⁷

Le système *RP-K[®]* doit être utilisé au sein d'un dispositif étanche à l'oxygène, à l'humidité et à d'autres gaz. Il est donc toujours utilisé conjointement à une pochette thermosoudable réalisée à partir de film barrières.

D'autres sorbants, comme les sachets *Ageless[®]* sont également utilisés pour la mise en anoxie à la place des sachets *RP-K[®]*, mais à l'inverse de ces derniers ils ne permettent pas l'adsorption d'autres gaz que l'O₂²⁰⁸. Pour le dosage indiqué, le détail du calcul en *annexe 27, p. 91*.

Indicateurs Ageless Eyes[®]

Les indicateurs d'oxygène, qui se présentent sous la forme de pastilles bleues, sont également un élément indispensable des dispositifs de mise en anoxie. Placés à l'intérieur des pochettes barrières avec les sachets *RP-K[®]* et l'échantillon (toujours en évitant le contact direct) ces derniers permettent

²⁰⁵ Conservation Support System, 2013 [en ligne]

²⁰⁶ Boissonnas, 2014, *non publié*

²⁰⁷ A l'inverse des alliages métalliques, les objets organiques ont besoin d'un certain taux d'humidité (stable !) dans leur environnement et dans leur composition, au risque de se dessécher et d'entraîner des altérations structurelles (fissures, surface cassante,...). Mttc et OCIM, 2002, p. 49 et 66

²⁰⁸ Fenn, 1993, p. 352 et 361

d'apprécier visuellement l'évolution du taux d'oxygène et de juger de l'efficacité ou non du système²⁰⁹. La couleur bleue des indicateurs *Ageless Eyes*[®] devient progressivement rose, au fur et à mesure que la captation d'oxygène s'opère, jusqu'à prendre une couleur rose vif (entre 12-24h après la réalisation de la mise en place de la pochette) indiquant que le processus d'absorption de l'oxygène a abouti²¹⁰.

Le nombre d'indicateurs à insérer au sein de la pochette ne suit pas de règle absolue, mais doit convenir à la bonne lecture des utilisateurs. Dans le cas d'un petit volume, comme celui présenté et conservant l'échantillon, nécessite 1 voire 2 indicateurs.

Les indicateurs ont une durée de vie limitée dans leur emballage (environs 6 mois). Après ouverture de ce dernier, les indicateurs doivent être utilisés dans la foulée au risque de perdre en efficacité. Contrairement aux indicateurs *Oxy-Sign*[®], les *Ageless Eyes*[®] sont réutilisables. Une fois sortie de sa pochette, la pastille redevient bleue et peut être reconditionnée²¹¹.

4.2. Méthode 2 : Technique de surgélation

La surgélation est une technique avant tout utilisée pour la conservation des aliments. Elle se retrouve dans le domaine de la conservation des objets organiques patrimoniaux notamment, pour éradiquer une infestation ou dans le cas d'objets submergés qui ne peuvent être traités dans l'immédiat (en attente d'une lyophilisation) mais également comme méthode d'inhibition des processus de dégradation des polymères de synthèse, notamment pour le PVC²¹².

Maintenir l'échantillon à très basse température permet de diminuer considérablement la vitesse des processus de dégradation de la mousse et ainsi de conserver plus durablement son intégrité²¹³. De plus, l'échantillon étant placé dans un surgélateur, ce dernier est à l'abri de la lumière (UV). A l'instar de la congélation traditionnelle qui abaisse lentement la température (ce qui implique par conséquent la création de cristaux grossiers pouvant provoquer des altérations structurales) la surgélation permet de refroidir rapidement (en quelques minutes) le matériau à des températures très basses (-18°C à 35°C), de manière à ce que l'eau qu'il contient dans ses cellules se transforme en de petits cristaux limitant ainsi la dégradation de sa structure et la dénaturation de ses composants. Pour permettre ce type de congélation rapide, l'échantillon doit être directement placé dans un surgélateur (ou congélateur permettant cela) prérefroidi à -20°C²¹⁴. Pour du traitement préventif (non curatif) préférer une température aux alentours de -20°C qu'aller jusqu'à -35°C (qui est indiquée pour un traitement court d'éradication d'insectes !)

L'échantillon est ainsi inséré dans un sachet de PE²¹⁵ fermé hermétiquement et placé dans un surgélateur statué à -20°C, en veillant à chasser un maximum d'air de manière à limiter le risque

²⁰⁹ Atlantis, 2014 [en ligne]

²¹⁰ Conservation Support System, 2013 [en ligne]

²¹¹ Atlantis, 2014 [en ligne]

²¹² Shashoua, 2001, p.50-51

²¹³ Caple, 2011, p.206-07

²¹⁴ Roquebert, 2002, p.314

²¹⁵ Sachets polythène (Polyester, pas PVC)! Pinniger, 1994, p.36-38 et Pinniger et Winsor, 1998, p.24

de condensation²¹⁶. Les sachets de type *Minigrip*[®] se prêtent bien à cet usage, ceci par leur fermeture hermétique intégrée et leur transparence qui permet une visualisation directe de l'échantillon.

Sachet Minigrip[®]

Sachets transparents en PE de faible densité (PEBD) à fermeture intégrée, les sachets *Minigrip*[®] sont très fréquemment utilisés dans le domaine de la conservation pour l'emballage ou la mise en réserve d'objets aussi bien inorganiques, qu'organiques. Ils jouissent d'une grande inertie et stabilité chimique ainsi que d'une bonne imperméabilité à l'eau liquide. Ces sachets sont également faciles d'utilisation, peu chers et facilement accessibles sur le marché, même auprès de fournisseurs non-spécialisés. En revanche, ils sont électrostatiques, ils se froissent et se percent facilement et présentent une perméabilité moindre à la vapeur d'eau et aux autres gaz (CO₂ et O₂)²¹⁷.

Caractéristiques	
<i>Composition</i>	PEBD
<i>Epaisseur</i>	50-60 microns
<i>Dimension</i>	Existe sous de nombreuses dimensions, ici 150x180 mm
<i>Prix</i>	Très avantageux, moins de 5€/100 sachets
<i>Perméabilité H₂O</i>	5 g/m ² /24h ²¹⁸

Les sachets *Minigrip*[®] peuvent être utilisés à des températures allant jusqu'à -22 °C.

Surgélateur

On trouve des surgélateurs (450 litres) neufs et d'entrée de gamme pour environ 400 euros. Par ailleurs, l'acquisition d'un surgélateur d'occasion peut également être faite assez facilement auprès d'Institutions telles que Caritas, l'Armée du Salut ou Emmaüs, pour des sommes ne dépassant pas 100 euros²¹⁹. Outre leur capacité en litres, il faut également prêter une attention particulière à la catégorie énergétique du surgélateur (favoriser A-A+++) pour éviter toute surconsommation coûteuse à long terme. Par ailleurs, le MnHN préconise de placer l'échantillon sur un support favorisant la circulation de l'air²²⁰, ce qui est possible dans l'exemple présenté par les paniers ou plateaux grillagés contenus très souvent dans les appareils de réfrigération.

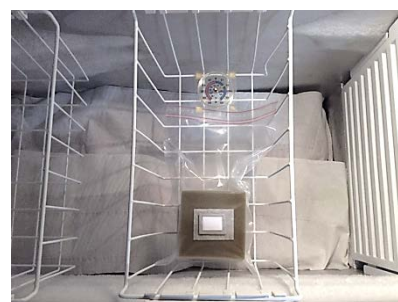


Figure 38 Méthode 2 : résultat final

²¹⁶ Roquebert, 2002, p.314

²¹⁷ Flexico, p.8-12, 2014 et Boulanger, 2014, *non publié*.

²¹⁸ Kanaan, 2006, p.36

²¹⁹ Certains congélateurs traditionnels ont une fonction « surgélateur ». Whirlpool, 2015 [en ligne].

²²⁰ Roquebert, 2002, p.314

Bien que l'usage d'un tel dispositif puisse paraître exagéré par rapport aux échantillons à conserver, le musée peut également imaginer placer d'autres types de matériaux/objets problématiques très dégradés ou s'altérant rapidement dans leur espace de stockage respectifs, notamment des polymères de synthèse, pour lesquels cette technique de conservation à long terme est préconisée²²¹.

4.3 Méthode 3 : Boîte en carton de qualité conservation avec sorbants

Cette méthode de conservation consiste à placer l'échantillon dans une boîte en carton de qualité conservation avec à l'intérieur, un dessiccateur et un absorbeur de polluants²²². Un dispositif de calage en mousse PE est également intégré, dans lequel viennent s'intégrer l'échantillon et les différents produits utilisés, de manière à éviter leur contact direct²²³. Bien qu'il s'agisse de mousse à conditionner, celle des sièges de rembourrage de l'avion est devenue particulièrement fragile, pulvérulente et doit donc, au même titre que n'importe quel bien fragilisé, disposer de moyens de protection permettant de lui éviter quelque contrainte mécanique (les secousses notamment)²²⁴. Le dispositif de calage en mousse PE jouera également le rôle d'intercalaire entre l'échantillon test et les parois de la boîte dans la mesure où, ce sont les endroits du conditionnement soumis aux perturbations les plus importantes²²⁵. En m'inspirant des caissettes de conditionnement de gel de silice (directement prêtes à l'emploi) proposées par les fournisseurs spécialisés, les granules de *Proisorb*[®] et de charbon actif (matériaux sorbants choisis pour le conditionnement) sont contenues séparément dans une boîte (PS) sans couvercle, recouverte d'un tissu micro-perforé de PE pour permettre les échanges avec le milieu²²⁶.



Figure 39 Méthode 3 : résultat final

Carton ondulé de qualité « conservation »

Les fibres qui composent ce carton sont exemptes de lignines* et constituées majoritairement d'alpha cellulose²²⁷, ce qui le rend très stable chimiquement (pH neutre : 7). De plus et selon les situations, ce matériau peut être accompagné ou non d'une réserve alcaline, comme du carbonate de calcium (pH entre 7.5-8.5)²²⁸. D'un point de vue physique, le traitement mécanique reçu par le matériau, l'ondulation, le rend à la fois robuste et léger, absorbant bien les chocs avec une certaine résistance à

²²¹Mttc et OCIM, 2002, p.66

²²² La démarche d'utiliser une boîte en carton de qualité conservation m'a été suggérée par Mme Sylvie Ramel. Ramel, 2015, *entretien oral*

²²³ L'utilisation d'un support en carton aurait également pu être envisagée, mais n'aurait pas offert la même protection mécanique à la mousse.

²²⁴ Un intercalaire en non-tissé de polyester est placé entre l'échantillon et le support de manière à éviter les abrasions.

²²⁵ Préserv'Art, 2011 [en ligne]

²²⁶ Atlantis, 2010, p.1

²²⁷ Carton constitué à 100% de pâte dite « chimique ». a. Préserv'Art, 2010 [en ligne]

²²⁸ a.Préserv'Art, 2010 [en ligne]

la pénétration²²⁹. Il présente également une surface lisse et généralement grise. Le carton ondulé de conservation « *a l'avantage d'être hygroscopique, c'est-à-dire d'absorber* et de rejeter l'humidité*²³⁰. » Cette dernière propriété permet d'éviter les variations thermohydrométriques importantes à l'intérieur du conditionnement, des variations qui peuvent être la cause de dégradations irréversibles pour les objets²³¹.

Le carton ondulé de qualité « conservation » est indiqué pour assurer la conservation préventive des objets à long terme, tant sur le plan chimique que mécanique. Toutefois il faut se méfier de l'utiliser avec une réserve alcaline lorsqu'il est censé conserver un objet potentiellement acide²³². C'est pourquoi dans le cas présent on en préfère un qui en est dépourvu.

Gel de silice

Le gel de silice est un matériau tampon qui se présente sous la forme de granules de silice (très riches en SiO₂) de 2 à 5 millimètres de diamètre. Il possède une surface particulièrement poreuse lui conférant une grande capacité d'absorption (jusqu'à 40% de son poids) et de désorption de la vapeur d'eau, ce qui permet une régulation de l'hygrométrie du milieu selon la valeur d'humidité à laquelle le produit a été conditionné. Ce produit est chimiquement inerte, très stable d'un point de vue dimensionnel et non toxique, ce qui le rend compatible avec la majorité des objets patrimoniaux. Le gel de silice peut également être additionné à un indicateur coloré, sa couleur varie ainsi de l'orange au blanc ou du bleu au rose en fonction de la quantité d'eau observée, permettant ainsi un contrôle visuel du degré de saturation²³³. Le gel de silice se régénère en le chauffant durant environ 3 heures à un peu plus de 100 °C, processus qui peut être répété plusieurs fois²³⁴. L'utilisation de gel de silice est recommandée pour des petits volumes et plus ce dernier sera étanche à la vapeur d'eau, plus ses qualités de matériaux tampons seront efficaces²³⁵.

Le gel de silice peut donc soit être utilisé pour créer un environnement à hygrométrie stable soit un environnement sec. Dans le cas d'un matériau organique comme la mousse de polyuréthane on cherchera à obtenir une humidité stable à un taux conforme à ses exigences de conservation à long terme (50%)²³⁶. Les granulés de gel de silice doivent donc être conditionnés en conséquence. Avant de placer le produit dans le conditionnement, le gel de silice doit impérativement être placé au préalable dans une pochette ou un conteneur à paroi(es) en non-tissé, ce qui limite la formation de

²²⁹ Ibidem

²³⁰ Préserv'Art, 2011 [en ligne]

²³¹ Un tableau présentant les principaux avantages et inconvénients du carton ondulé conservation est à consulter en *annexe27, p.100*

²³² Barclay, 2002, p.7-8

²³³ Atlantis, 2009, p.1-3

²³⁴ Pour la préparation du gel de silice selon le % d'humidité souhaité se référer à Atlantis, 2010 [En ligne] (*Prosorb*[®]-Fiche technique à télécharger, p.4 et 5)

²³⁵ b. Tétreault, 2003, ch.gel de silice

²³⁶ Autrement dit, le dessiccateur dans la situation présente, ne doit pas enlever complètement l'humidité mais en maintenir une stable, à une valeur comprise entre 40-55% (<40% : risque de fissure du matériau/ >55% : phénomène d'hydrolyse). Mttc et OCIM, 2002, p.66

poussières tout en permettant les phénomènes d'adsorption et de désorption. Le gel de silice type E microporeux est tout indiqué pour ce type d'emploi²³⁷.

Prosorb[®]

Le *Prosorb*[®] peut également être utilisé comme dessiccateur. C'est un dérivé du gel de silice traditionnel dont les qualités de sorbant sont supérieures à ce dernier. C'est un matériau hygroscopique à structure poreuse constituée à 97% de SiO₂ (3% Al₂O₃) jouissant d'une grande inertie, ce qui le rend compatible avec presque toutes les catégories de matériaux²³⁸. Le *Prosorb*[®] permet de maintenir une hygrométrie stable à l'intérieur du contenant ou de la ramener au niveau souhaité par phénomène d'adsorption/désorption de l'humidité relative. Parmi les autres dessiccateurs présents sur le marché (*Artsorb*[®], *Silicagel E*[®] ...), il est le plus performant pour une humidité comprise entre 40-60%²³⁹, soit l'intervalle de valeur d'hygrométrie souhaité pour la mousse PUR. Les granulés *Prosorb*[®] peuvent se retrouver sous la forme de sachets en non-tissé de PE (ou polyester) ou cassettes (en PP avec couvercle en non-tissé de polyester²⁴⁰) pré-conditionnés à différents niveaux d'humidité relative (40, 50 ou encore 60% par exemple) avec indicateur coloré²⁴¹. Ses performances supérieures d'absorption permettent d'insérer une plus petite quantité de produit au sein du conditionnement pour une efficacité similaire.

Tableau 1 Le *Prosorb*[®] est le produit le plus adapté aux conditions d'hygrométrie recherchées pour la mousse PUR

Tableau comparatif des capacités d'absorptions des différents stabilisateurs d'humidité (25°C) ²⁴²						
Table: Adsorption capacity at 25°C:			©Waller, 2015			
Relative humidity	PROSorb		ART SORB		Silica gel E = microporous	
	Water adsorption in weight %	Between 40% - 60% RH	Water adsorption in weight %	Between 40% - 60% RH	Water adsorption in weight %	Between 40% - 60% RH
10% RH	6.2%		6.5%		7%	
20% RH	10.6%		11.5%		14%	
30% RH	16.2%		16%		20.5%	
40% RH	22.5%	16,3%	22%	13%	25%	5,5%
50% RH	30.4%		26%		28.5%	
60% RH	38.8%		35%		30.5%	
70% RH	44.9%		54%		32%	
80% RH	46.8%		67%		33%	
90% RH	48%		74%		34%	
100% RH	49%		80%		35%	
Prix(€/Kg) ²⁴³	72		85		38	

²³⁷ Atlantis, 2009, p.1-3

²³⁸ Atlantis, 2010, p. 1-2

²³⁹ b.Waller, 2014 [en ligne]

²⁴⁰ Atlantis, 2010, p.1-3

²⁴¹ Granulés teintés en bleu qui deviennent progressivement rose au fur et à mesure qu'ils se chargent en eau.

²⁴² b.Waller, 2014 [en ligne]

²⁴³ Non-conditionné, sans frais d'envoi chez Atlantis-FR

L'efficacité du gel de silice et autre produits sorbants dépend également de la surface d'échange qu'il entretient avec le milieu. Plus cette dernière est importante, plus son efficacité sera grande (une épaisseur 2 cm est recommandée²⁴⁴).

Charbon actif

Il existe sur le marché plusieurs matériaux permettant de fixer les émissions volatiles polluantes et ainsi les rendre « inactives ». Le charbon actif est le plus connu et le plus accessible sur le marché. Constitué essentiellement de carbone, il présente une structure poreuse²⁴⁵ permettant d'adsorber des gaz corrosifs tels que le dioxyde de soufre (SO₂), le chlorure d'hydrogène (HCL) ou encore l'acide azohydrique (HN₃)²⁴⁶.

Le détail du calcul des doses relatif au charbon actif, gel de silice et de *Prosorb*[®] est à consulter en *annexe 28, p.114-117*.

Mousse de PE

La mousse de PE non-réticulée à macrocellule fermée de type Ethafoam[®] (plaque de 5 centimètres d'épaisseur) permet une bonne absorption des chocs mécaniques et des vibrations et est chimiquement stable et inerte. De plus, elle est facile à mettre en forme²⁴⁷. Pour des informations complémentaires sur les mousses de type PE, consulter le *chapitre 5.1 p.73*.

4.4 Méthode 4 : Boîte en polypropylène de type Rako[®] avec sorbants

Le principe de cette méthode est similaire à la méthode 3, à la seule différence que la boîte en carton est remplacée par un contenant (avec couvercle) en PP de type Rako[®]. Ainsi on retrouvera à l'intérieur du contenant du charbon actif, du gel de silice et un dispositif de calage de l'échantillon.



Figure 40 Méthode 4 : résultat final

Boîtes Rako[®]

Les boîtes Rako[®] sont fréquemment utilisées dans le domaine muséal pour le conditionnement à long terme des objets. Le PP, au même titre que le PE, est connu pour être un polymère stable d'un point de vue physico-chimique et inerte²⁴⁸. Ces boîtes, comportant un couvercle indépendant, sont rigides (densité d'environ 0.95kg/m³) et utilisables à des températures allant de -20°C à 100°C. Leur teinte grise opaque permet une protection efficace contre

²⁴⁴ a. Tétreault, 2003, p.63

²⁴⁵ Le charbon actif se différencie du charbon par une structure davantage poreuse obtenue par réactions de pyrolyse ou d'oxydation. Lenntech, 2014 [en ligne]

²⁴⁶ Quye et Williamson, 1999, p.94 et Shashoua, 2001, p.52

²⁴⁷ ICC, 1994 [en ligne]

²⁴⁸ Bossuat, 2011, p.1

les UV et autres rayons lumineux²⁴⁹. Disposant d'une très bonne imperméabilité à l'eau, elles sont en revanche d'étanchéité moindre aux autres gaz, mais malgré tout supérieures aux autres boîtes en polymère de synthèse (ex : PS).

Tableau 2 *Tableau comparatif des niveaux de perméabilité à l'eau et aux gaz des boîtes dites "plastiques"*²⁵⁰

Matériaux (épaisseur 200 microns)	Densité (g/cm ³)	Perméabilité (g/m ² /jour) (40°C à 90% HR)	Perméabilité (cm ³ . mm/(atm ⁻¹ m ²)/jour) 23°C, 0%HR		
			Vapeur d'eau	N2	O2
PP et PEHD	0.95	0.12	1.26	9.28	17.41
PEBD	0.9	0.2-0.3	2.75	13	40
PS	1.05	3.35	1.2	20	50
PA (6)	1.15	3.4	0.55	1.73	7.5

Par ailleurs, des boîtes en PP standard, utilisées notamment dans la conservation des aliments peuvent également être utilisées, moyennant quelque aménagement. En effet, ces dernières sont le plus souvent semi-rigides, présentent des parois transparentes n'agissant pas sur l'action dégradante de la lumière, principal facteur de dégradation des polymères de synthèses. Un moyen efficace, simple et pas cher d'offrir une barrière efficace contre la lumière non seulement pour l'échantillon mais également pour la boîte elle-même, est de recouvrir entièrement cette dernière d'un film aluminium alimentaire.

Les boîtes Rako au même titre que les autres modèles de boîtes en PP et PE ont l'avantage de se trouver facilement en magasins (même non spécialisés) sous un vaste choix de formes et de dimensions et d'être très abordables. Comptez 10 euros pour une boîte Rako® de capacité de 5 litres (17x27x11 cm, comme celle utilisée) avec couvercle.

Pour les méthodes 3-4 c'est avant tout la protection contre une humidité instable et inadéquate et l'élimination des gaz corrosifs que l'accent est mis. De plus, une protection contre les UV et autres rayons lumineux est permise par les dispositifs.

Pour permettre de comparer ces deux méthodes de manière adéquate, il a été souhaité que les deux conditionnements présentent un volume similaire (soit environ 5 litres) et une même disposition interne.

A titre de compléments d'informations, une étude réalisée sur le comportement des boîtes de conservation aux variations thermohygro-métriques a permis de mettre en avant le fait que, dans le cas d'une humidité instable, les variations d'hygrométrie subies au sein des boîtes en carton et en PP

²⁴⁹ UTZ, 2002, p. 1

²⁵⁰ Tableau réalisé sur la base de Kanaan, 2006, p.33-36 et Carma, 2004, p. 2-3

sont quasi similaires, malgré une imperméabilité à la vapeur d'eau bien supérieure de ce dernier²⁵¹. Ceci démontre bien le rôle tampon que joue le carton ondulé, qui participe à la régulation de l'hygrométrie. Cette étude a également démontré que dans le cas d'un environnement instable au niveau de la température, mieux vaut choisir une boîte PP alors que dans le cas d'une humidité instable, une boîte en carton est davantage indiquée²⁵².

4.5 Méthodes de conservations dites basiques

Les méthodes 5, 6 et 7 décrites ci-dessous s'inscrivent dans une optique de vouloir proposer des méthodes très abordables d'un point de vue économique et de la mise en œuvre, mais qui présentent un intérêt certain quant à une conservation à long terme du matériau. Le principe général de ces dernières consiste à permettre à l'échantillon de bénéficier d'un emballage protecteur l'isolant au mieux de facteurs de dégradations tels que la lumière, la poussière, les insectes rampants ou encore tout contact direct avec une surface problématique²⁵³ (surface au pH basique ou tout simplement insalubre). Ce principe d'emballage protecteur s'inspire des propos tenus par Jean Tétreault dans son ouvrage consacré aux polluants où il stipule que, lorsqu'un objet n'a pas besoin d'être exposé, l'emballer dans un matériau sorbant (tel du papier de soie non-acide) est un moyen pas cher et efficace de le protéger sur le long terme des sources polluantes extérieures. Ou que l'utilisation d'une simple pochette en PE peut ralentir considérablement certains processus de dégradation, notamment l'oxydation²⁵⁴.

Dans le cas de ces méthodes, il est difficile de chiffrer leurs caractéristiques techniques (notamment leur niveau d'étanchéité à l'eau et aux gaz) ceci par manque de données précises fournies par les fournisseurs et fabricants sur certains produits (malgré des demandes répétées). Aussi parce qu'elles se basent en grande partie sur des recommandations et appréciations essentiellement qualitatives issues d'ouvrages spécialisés et qui ont fait l'objet de quelques adaptations.

4.5.1 Méthodes 5 : *Sachet Minigrip® avec écran en aluminium*

Cette méthode consiste à combiner les propriétés « protectrices » des sachets *Minigrip®* avec celle du film d'aluminium.

Pour ce faire, l'échantillon est placé dans une première pochette *Minigrip®*. Comme l'échantillon PUR test et ce type de sachet sont particulièrement sensibles à la photoxydation, le dispositif est emballé avec du film d'aluminium (alimentaire) jouant le rôle de barrière contre les effets néfastes de la lumière²⁵⁵. Par ailleurs, comme le sachet et le film aluminium qui l'entoure se froissent et se percent

²⁵¹ Bossuat, 2011, p.3

²⁵² Bossuat, 2011, p.6

²⁵³ Doyal, 1999, p.28-29

²⁵⁴ a.Tétreault, 2003, p.55

²⁵⁵ Le film d'aluminium protège efficacement le matériau qu'il contient des UV, IR et dans une moindre mesure des polluants atmosphériques et de l'eau (liquide et vapeur). Alufoil, 2014 [en ligne]

facilement, le tout est inséré dans une seconde pochette *Minigrip*[®], ce qui permet d'améliorer de manière générale la résistance physico-chimique du dispositif.

Les niveaux de perméabilités exactes de ces pochettes (PEBD pour une épaisseur de 50 microns) aux polluants atmosphériques et à l'oxygène ne m'ont malheureusement, pas été fournis par les fournisseurs et fabricants. On peut néanmoins assurer qu'elles possèdent des qualités de barrière moindres comparées aux boîtes en PEHD (à épaisseur égale) si l'on se réfère *au tableau 2, p.63*. La perméabilité aux gaz azotés tel N₂ (COV susceptibles d'être dégazés par la mousse PUR), n'est pas un paramètre négatif dans le cas d'un conditionnement fermé dépourvu d'adsorbant de polluants (comme c'est le cas pour cette méthode). Ceci évite une stagnation de ce gaz laissant place à une concentration élevée en polluant dans le milieu où est contenu l'échantillon²⁵⁶.



Figure 41 Méthode 5 : résultat final

Tableau 3 Comparatif entre la perméabilité à la vapeur d'eau des sachets *Minigrip*[®] et les boîtes PEHD à épaisseur égale (50 µm)²⁵⁷.

Matériaux (épaisseur 50 µm)	<i>Minigrip</i> [®] PEBD	Boîte PEHD	PA (6)
Perméabilité à la vapeur d'eau (g.50µm/m ² /jour) 40°C à 90% HR	5	3	85

Par ailleurs, les principaux fournisseurs m'ont également informé de l'existence de pochettes (PEBD) avec une paroi en aluminium laminé ou encore avec du cuivre activé intégré jouant le rôle d'antioxydant permettant de limiter plus efficacement contre l'oxydation de l'échantillon²⁵⁸.

4.5.2 Méthode 6 : Pochette en Tyvek[®]

Cette méthode se base sur les propos de Mme Sherry Doyals qui présente les bienfaits d'un simple emballage en *Tyvek*[®] pour la préservation des matériaux modernes problématiques, dont les « plastiques » font figure de mauvais élève²⁵⁹. Dans le cas présent, l'échantillon est placé dans une pochette en *Tyvek*[®] cousue selon les dimensions de la mousse et dont l'ouverture est refermée par un clip (PP). Ce système permet une ventilation naturelle sans laisser pénétrer de poussières et présente des qualités d'imperméabilité à l'eau et



Figure 42 Méthode 6 : résultat final

²⁵⁶ Bossuat, 2011, p.1

²⁵⁷ Kanaan, 2006, p.36

²⁵⁸ Par ailleurs, ces pochettes sont plus chères mais également moins facilement disponibles. Cenpac, 2014 [en ligne].

²⁵⁹ Doyal, 1999, p.28

aux polluants atmosphériques. De plus, ce type de pochette protège en partie le matériau des rayons lumineux.

Tyvek[®]

Le *Tyvek[®]*, comme la plupart des produits dérivés de fibre pure, haute densité (HDPE) est très stable et inerte sur le plan physico-chimique et est également largement utilisé en conservation-restauration pour la confection de housse de protection ou comme matériau intercalaire. C'est un matériau léger (41g/m²), non abrasif, facilement mis en forme (se thermosoude, s'agrafe ou se coud), extrêmement résistant à la déchirure (extensible jusqu'à 130%) et aux températures extrêmes (utilisable de -70 °C à + 100°C)²⁶⁰. Dun point de vue de ses qualités de barrières, le *Tyvek[®]* présente une très bonne imperméabilité à la vapeur d'eau et aux polluants environnementaux (CO₂ ; composés azotés,...). Sa structure micro-perforé allie aération naturelle (évitant toute concentration élevée en polluants du milieu comprenant l'échantillon) et protection contre la poussière. Le *Tyvek[®]* se trouve facilement sur les sites spécialisés et coûte environ 35 euros/m²²⁶¹.

Les méthodes 5 et 6, qui utilisent un matériau de même nature (PE), permettront de comparer l'efficacité entre un système dit « fermé » (*Minigrip[®]*) et un système partiellement ouvert (sachet micro-perforé).

4.5.3 Méthode 7 : Papier de soie

Toujours dans les propositions les plus abordables, l'efficacité de cette dernière méthode se base sur les propos de Jean Tétreault qui stipulent les bénéfices apportées par le simple emballage d'un objet dans du papier de soie. Outre l'adsorption de polluants²⁶², ses qualités de matériau tampon lui permettent également d'avoir un effet régulateur sur l'hygrométrie.

Par ailleurs, en double ou triple épaisseur, le papier de soie préserve l'échantillon d'une exposition directe à la lumière, aux poussières mais également aux insectes. Deux lanières, constituées également à partir de papier de soie, permettent de maintenir l'emballage en place²⁶³.



Figure 43 Méthode 7 : résultat final

²⁶⁰ a.Stouls, 2015 [en ligne]

²⁶¹ b. Atlantis, 2015 [en ligne].

²⁶² a.Tétreault, p.55 et Reilly, 1991 [en ligne]

²⁶³ Les lanières en papier de soie présentent deux avantages : elles sont de la même nature que l'emballage principal, ce qui évite toutes interactions fâcheuses et leur résistance mécanique limitée empêche d'induire des contraintes mécaniques dues à un serrage trop important (cèdent avant, ce qui est un bon indicateur).

Tableau 4 Comparatif des qualités tampon de différents matériaux

Capacité tampon (M) de différents matériaux (g kg ⁻¹ %RH ⁻¹) ²⁶⁴			
Matériau	30-50%	50-60	60-80
Gel de silice ordinaire	4	2	1
Bois	2	2	2.5
Cotton (papier)	1	1	1.5

Papier de soie non-acide

Papier de couleur blanche d'une grande pureté, composé uniquement de pâte chimique sans acide (exempte de lignine), qui lui confère une grande stabilité et inertie physico-chimique. Son utilisation dans le domaine de la conservation-restauration est très répandue et sert à de nombreuses applications : emballage, conditionnement, matériau de rembourrage pour le transport mais aussi comme matériau intercalaire ou tampon²⁶⁵. Comme pour le carton, il est préférable, dans la situation présente, de choisir un papier sans réserve alcaline, qui peut être à l'origine de réactions acido-basiques. Ce matériau est disponible sous forme de rouleau ou de feuilles prédécoupées. Son prix est de 0.3 euros/m²²⁶⁶.

Autres mesures

Par recommandation de Sylvie Ramel, un segment de papier blanc traditionnel acide²⁶⁷ d'environ 2 cm est placé dans chacun des conditionnements. Le papier réagit avec les COV du milieu et aura tendance à jaunir en cas de concentrations élevées, ce qui peut signifier une mauvaise ventilation ou adsorption des polluants. Bien que très simple, ce dispositif s'avère être un critère d'évaluation visuel qualitatif pertinent pour juger de l'efficacité des conditionnements sur le long terme²⁶⁸. Pour des raisons pratiques, l'ensemble des conditionnements créés (excepté celui surgelé) seront contenus dans une boîte commune suffisamment grande pour éviter qu'ils ne se chevauchent. Par ailleurs, pour juger de l'efficacité des méthodes mises en œuvre, cette dernière ne doit pas avoir d'influence particulière sur l'environnement des échantillons. C'est pourquoi j'ai opté pour une boîte transparente en PE (stable et inerte d'un point de vue physico-chimique) comportant plusieurs ouvertures, de manière à ne pas offrir une protection supplémentaire pouvant interférer sur l'efficacité des méthodes des divers conditionnements réalisés.

²⁶⁴ Thomson, 1986, p.236

²⁶⁵ b. Préserv'Art, 2010 [en ligne]

²⁶⁶ c. Atlantis, 2015 [en ligne]

²⁶⁷ Tous les papiers ordinaires que l'on retrouve en bloc peuvent être utilisés à cet effet, pour autant qu'ils ne comprennent pas d'imprimés/encre et qu'ils ne soient pas recyclés (perturbe l'appréciation visuelle).

²⁶⁸ Assemblage de cet indicateur de polluant papier à consulter en *annexe 27, p. 112-113*.

Un échantillon de référence (contenu dans aucun conditionnement) est placé dans les mêmes conditions environnementales et permettra, par comparaison, de constater également l'efficacité ou non des méthodes de conservation proposées.

Tableau 5 Tableau récapitulatif et comparatif des caractéristiques des différentes méthodes.

Méthode	P. UV	Régulation HR	P.O2	P. gaz polluants (CO2 ; N2,...)	P. T° élevées	P. Poussières	P. Mécanique	P. Insectes et MO.	Facilité de mise en œuvre	Prix ²⁶⁹
1										55
2										χ ²⁷⁰
3										10
4										20
5										1
6										4
7										2

Légende			
Très bon	Bon	Moyen	Médiocre

Le tableau ci-dessus donne une première appréciation qualitative globale des différentes méthodes proposées, réalisé sur la base des informations recueillies auprès des fournisseurs/fabricants spécialisés et de professionnels de la conservation-restauration. Ce dernier ne se veut pas exhaustif ni d'un degré de précision absolu (faute d'informations parfois lacunaires sur certains produits et du suivi des différentes méthodes sur le long terme), mais suffisant pour avoir un premier aperçu des qualités et limites de chacune d'elles.

Comme le lieu de stockage définitif des échantillons tests n'a pas encore été défini par le musée, on ne peut être en mesure de connaître les conditions environnementales qui leur seront offertes. Raison pour laquelle le calcul des doses des différents produits s'est basé sur des paramètres standards. Outre les différents conditionnements ou emballages, les conditions offertes par le lieu de stockage et la manipulation des échantillons sont également des paramètres essentiels pour la conservation à long terme.

Une liste de recommandation pour le stockage et la manipulation des échantillons tests est à consulter en *annexe 29, p.117*.

²⁶⁹ Prix estimé en euros pour un échantillon de mousse de 10 cm³, sans compter la main d'œuvre ni d'éventuels frais de ports.

²⁷⁰ Le coût du matériel pour la mise en surgélation est négligeable (10 centimes, soit l'achat d'un sachet *Minigrip*®), seule l'acquisition du surgélateur est plus conséquente (occasion pour 100 euros)

5. Matériaux/dispositifs de remplacement

Ce paragraphe traite des matériaux ou dispositifs recommandés pour remplacer la mousse actuelle endommagée et tentera également de présenter des alternatives au remplacement complet de la mousse de rembourrage actuelle.

Les opérations de mise en forme pour obtenir le produit final (coussin d'assise et du dossier) ne seront pas abordées²⁷¹, seules des propositions de matériaux appropriés seront faites et argumentées. Ces propositions sont issues d'une réflexion basée sur des recherches bibliographiques concernant le choix des matériaux, de conseils de professionnels (conservateur-restaurateur, garagistes, concepteur de sièges, fournisseurs spécialisés), des exigences et objectifs de conservation-restauration actuelles et ceux fixés par les responsables du musée.

Comme l'Institution n'est pour l'heure pas fixée sur l'utilisation future de l'avion, elle souhaite disposer de plusieurs solutions pour les différentes fonctions que les sièges pourraient être amenés à remplir soit une restitution fonctionnelle, muséographique ou encore sensitive. Par ailleurs, la question de la lisibilité de l'intervention sera également prise en compte.

Restitution fonctionnelle

Une restitution fonctionnelle implique que le nouveau matériau de rembourrage permette aux visiteurs d'utiliser les sièges. Il devra donc résister à de fréquentes sollicitations sur le long terme. Résilience, résistance au fluage sous pression, stabilité physico-chimique sont autant de propriétés capitales pour satisfaire à cette exigence.

Restitution muséographique

Une restitution muséographique signifie que le matériau proposé permette au siège de retrouver l'apparence la plus proche de celle présentée à l'époque de l'utilisation de l'avion. Or les exigences imposées par une restitution muséographique implique de raisonner différemment. Cette dernière ne nécessite pas que le matériau doive, d'un point de vue mécanique, supporter la charge des visiteurs, qu'il fasse preuve de résilience ou encore d'une grande souplesse. Dans le cas présent, la mousse aura davantage un rôle « support d'exposition » visant à redonner le volume et la forme aux différents sièges (elle doit donc faire preuve d'une plus grande rigidité) en mettant en avant les matériaux originels des sièges (housses,...) au même titre que certaines contre-formes réalisées spécifiquement pour l'exposition de vêtements. C'est pourquoi, pour ce type de restitution, mes recherches cibleront avant tout des mousses recommandées pour la réalisation de supports en conservation-restauration, démontrant une bonne tenue mécanique, une stabilité et une inertie chimique ainsi qu'une certaine rigidité pour un bon maintien de la forme désirée.

²⁷¹ Comme il s'agit de la reconstitution de plus de 100 sièges, il est clair que le choix du matériau prendra grandement en compte le fait que le fournisseur ou artisan soit disposé ou non à les mettre en forme.

Restitution sensitive

Par restitution sensitive, je veux évoquer un aspect qui se trouve à mi-chemin entre la restitution muséographique et fonctionnelle. Cette dernière se porte sur la capacité du matériau à offrir une sensation d'assise et de confort au plus près de celle du matériau d'origine au moment de sa sollicitation.

Lisibilité de l'intervention

La lisibilité de l'intervention est un principe important d'une restauration respectueuse de l'intégrité matérielle et immatérielle de l'objet²⁷², élément également partagé par le responsable des collections, qui en fait un critère important quant au choix du matériau final. Il évoque une volonté de ne pas duper le public quant à la valeur d'origine des matériaux constituant les sièges (fausse idée de la tenue d'un siège d'avion en temps réel) et surtout de ne pas induire en erreur des collaborateurs en conservation-restauration dans le cadre de futurs travaux d'investigations.

Choix d'un matériau

Le choix d'un matériau en conservation-restauration nécessite de prendre en compte de nombreux critères. La méthodologie de sélection employée s'est inspirée des principes évoqués par Jean Tétreault dans ses ouvrages consacrés au choix des matériaux en conservation-restauration²⁷³ mais aussi sur les guides de sélection utilisés en ingénierie²⁷⁴, domaine qui accorde également une place prédominante à l'étude des matériaux aussi bien en termes de coût que de compatibilité et de stabilité à long terme.

Exigences physico-chimiques

Le premier critère de sélection d'un matériau est qu'il puisse satisfaire les conditions mécaniques, chimiques et physiques d'utilisation qui lui sont destinées. Dans le cas présent le matériau devra se substituer au matériau de rembourrage actuel pour être amené à remplir deux fonctions principales, à savoir une restitution muséographique ou/et fonctionnelle des sièges. D'un point de vue mécanique, le matériau devra donc faire preuve d'une grande résilience (pour une restitution fonctionnelle), être suffisamment rigide pour maintenir la forme du siège et être résistant aux chocs. Par ailleurs, dans le cas d'une restitution sensitive, ce dernier devra également permettre de retrouver une consistance proche de celle d'origine. La mousse semble donc toute désignée pour continuer à être le matériau le plus adapté pour composer le rembourrage des sièges de l'avion. Concernant ses propriétés chimiques, la mousse proposée devra être compatible avec les autres éléments du siège (autrement dit ne pas mettre en danger l'objet dans lequel elle est contenue) et présenter une grande stabilité et

²⁷² Rabier, 2015, *entretien oral*

²⁷³ Tétreault, 1992, p.163-173 et Tétreault, 1993, p.1-8

²⁷⁴ Ashby et Jones, 1991.

inertie chimique sur le long terme. Ces principes sont fondamentaux en conservation-restauration, surtout si le matériau est utilisé dans le cadre d'une restauration²⁷⁵.

Exigences technologiques

Une fois le type de matériaux sélectionné, encore faut-il que ce dernier puisse être mis en forme selon la forme voulue²⁷⁶. Les mousses ont l'avantage d'être facilement mises en forme et des ajustements peuvent être réalisés avec des outils simples (cutter,...)²⁷⁷. De plus, de nombreux artisans proposent des coupes sur mesure et des industriels des séries de pièces directement moulées selon la forme désirée.

Exigences économiques

Lorsque plusieurs matériaux se valent au niveau des critères physico-chimiques, c'est souvent le prix qui oriente définitivement le choix²⁷⁸. Pour le musée de l'Air et de l'Espace, ce critère est primordial pour envisager quelque travail de restauration. Mais prudence, cela ne doit pas, dès le début, orienter les recherches. En effet, un matériau très bon marché à la base, peut s'avérer être une perte d'argent considérable sur le long terme, si ce dernier est instable d'un point de vue mécano-chimique et qu'il nécessiterait un remplacement précoce. En même temps faible coût ne signifie pas forcément mauvaise qualité.

Exigences environnementales et sanitaires

Ces notions d'exigence environnementales et sanitaires ont pris une place considérable ces dernières décennies. Il est donc légitime de les prendre en compte dans le choix d'un matériau de substitution. En effet, il est souhaitable que les nouveaux produits utilisés et les moyens mis en œuvre soient le plus possible respectueux de l'environnement et ne présentent aucune menace (toxique) pour les visiteurs²⁷⁹. Une fois de plus la notion de stabilité à long terme peut prendre toute son importance. En effet, l'utilisation de matériaux inertes ou très stables signifie qu'ils ne dégagent pas de COV dangereux et la longévité dont ils font preuve évitent une surconsommation de matériaux liés à des interventions systématiques.

Pistes envisagées

Dans un premier temps, je me suis basé sur les matériaux utilisés dans le domaine de la conservation-restauration, ce qui a pu diriger mes recherches. Plusieurs types de mousses, que l'on retrouve

²⁷⁵ Tétreault, 1992, p.163-164

²⁷⁶ Ashby et Jones, 1991, p.457-459

²⁷⁷ Garcia Gomez, 2011, p.86

²⁷⁸ Ashby et Jones, 1991, p.459-460

²⁷⁹ Ashby et Jones, 1991, p.461-462

notamment pour le conditionnement, sont recommandés pour le long terme, à savoir : les mousses de PE et de PP²⁸⁰.

Très vite mes recherches ont toutes convergé vers la mousse de PE et plus précisément de la ligne Ethafoam[®]. Cette dernière propose tout une gamme de mousses de différentes densités et conçues pour des usages spécifiques. Et justement, un des modèles est précisément conçu pour le rembourrage de sièges d'avions, il s'agit de la mousse de densité moyenne Ethafoam[®] 4101²⁸¹.

Par ailleurs, dans son travail de diplôme consacré à la problématique de conservation de la mousse PUR dans les sièges contemporains, Mme Mijanou Gold propose l'utilisation d'une mousse de PE traditionnelle de haute densité²⁸².

Enfin, Mme Sylvie Ramel, spécialiste des polymères de synthèses, m'a confirmé tout d'abord qu'à sa connaissance, l'utilisation de mousses était, parmi tous les types de matériaux ou de dispositifs existants, le choix le plus approprié. D'autre part, elle a suggéré également d'utiliser des mousses PUR de type éther, ces dernières permettant plus que toutes autres, une restitution muséographique et sensitive au plus proche de la mousse d'origine. Selon elle, les mousses PUR dernières générations jouissent²⁸³ d'une meilleure stabilité et inertie physico-chimique, que les modèles précédents dont la stabilité à long terme est souvent décriée dans le domaine de la conservation. Avis également partagé par Mme Boulanger, chargée d'enseignement à la HEArc C-R de Neuchâtel. Par ailleurs, les selliers et garagistes questionnés partagent cette position et me disent eux aussi, utiliser aujourd'hui et de manière presque systématique, de la mousse PUR pour la garnison des sièges, même pour les plus performants²⁸⁴. Bien que les artisans du milieu automobile ne proviennent pas du domaine de la conservation-restauration, il n'en demeure pas moins qu'ils sont sensibilisés à l'importance d'utiliser des matériaux durables dans leur travail. Il en va de leur réputation et d'enjeux financiers. Leur approche empirique de la stabilité des mousses utilisées est tout aussi pertinente que certains tests de vieillissement accélérés, puisqu'ils ont l'occasion de voir, dans leurs ateliers de réparations et quotidiennement, leur évolution en temps réel.

Les mousses de polyuréthane éther produites depuis déjà dix ans présentent donc un vif intérêt auprès des différents professionnels interrogés, pour leur durabilité, leur polyvalence et leur facilité de mise en œuvre, sans rien perdre de leur principal avantage : leur prix très abordable.

Pour appuyer davantage la légitimité de l'utilisation de ce type de mousses plusieurs dispositions d'ordre préventif et suggéré par Sylvie Ramel, peuvent être prises pour s'assurer de son innocuité,

²⁸⁰ Garcia Gomez, p.90-92

²⁸¹ Sealed Air, 2013 [en ligne]

²⁸² Gold, 2004, p.38 (annexes)

²⁸³ De manière générale, préférer le noir, blanc ou gris (pigmentation carbone non nocive)

²⁸⁴ Pretalli, 2015, *échange courriel* et Maison Salamandre, 2014 [en ligne]

comme l'utilisation d'une housse de protection intercalaire ou encore de préférer une mousse de couleur noire, blanche ou grise (comportant des additifs plus stables).

5.1 Matériaux proposés

Ainsi, mes propositions de matériaux de remplacement concernent 4 modèles de mousses, provenant de deux types différents (mousse PE et PUR), qui ont certes toutes leurs spécificités, avantages et inconvénients mais qui présentent toutes le plus grand intérêt pour la situation présente.

Mousse de PE

La synthèse des mousses PE est issue de la polymérisation des monomères d'éthylène. Ce sont des matériaux inertes, possédant une excellente stabilité chimique. Les mousses PE peuvent se retrouver sous de nombreuses densités (basse, moyenne ou haute), de couleurs et sous deux types de structure (réticulé ou non). Les propriétés des mousses de PE sont donc nombreuses et doivent être sélectionnées en fonction des besoins²⁸⁵. Sa polyvalence fait qu'on la retrouve pour de nombreux usages en conservation-restauration (conditionnement, support, matelassures,...).

Après avoir passé en revue les différentes mousses PE existantes, deux modèles ont été sélectionnés, dont une de la gamme Ethafoam[®] (ligne très répandue et qui est systématiquement citée pour avoir fait ses preuves dans le domaine de la conservation-restauration) et une de la gamme Plastazote[®], qui semble tout à fait convenir à la situation. La grande qualité de ces mousses est qu'elles ne contiennent pas de CFC ni d'HCFC dans leur composition et la présence d'autres agents gonflants qu'en infime quantité, ce qui en fait des produits très stables et inertes²⁸⁶.

5.1.1. Mousse PE Ethafoam[®] 4101

Mousse PE Ethafoam[®] 4101
<p>Description :</p> <p>Cette mousse PE, issue d'une large gamme de produits, a spécialement été conçue pour le rembourrage de sièges d'avion et pour répondre aux exigences des compagnies aériennes commerciales, tant du point de vue sanitaire et sécuritaire que du confort. Elles respectent, entre autre, les normes fédérales américaines (FAR 25, 853) et les directives Airbus (ABD 0031), qui régissent les exigences de qualité des matériaux se trouvant dans la composition des avions.</p> <p>Mousse extrudée*, à alvéoles fermées, elle présente une composition monocouche et est de densité moyenne (densité standard : 35.2 kg/m³)²⁸⁷.</p>

²⁸⁵ Garcia Gomez, 2011, p.91

²⁸⁶ De nombreux ouvrages spécialisés dans le domaine de la conservation recommandent de la mousse PE Ethafoam[®] et Plastazote[®] comme matériaux idéale pour une conservation à long terme. Tétreault et Williams, 1992, p.9, Rémillard, 1995, p.6-7 et Caple, 2011, p.100-101

²⁸⁷ Sealed Air, 2013 [en ligne]

Avantage:

Légère, flexible souple et solide à la fois, elle possède une grande stabilité physico-chimique ; une excellente résistance au fluage sous charge, à la chaleur, à l'hydrolyse et aux produits chimiques (notamment les solvants) ; une très bonne absorption des chocs et des vibrations et une capacité de résilience supérieure. De plus, sa surface est non abrasive (plus douce et lisse que les autres mousses de PE) et est particulièrement facile à mettre en forme (pour des retouches ou ajustement au cutter). Les retardateurs de flammes qu'elle contient limitent au maximum tout risque d'incendie dans la cabine. Ce modèle de mousse est recyclable²⁸⁸.

Désavantage :

Prix élevé, comparé aux autres mousses PE. Même si la stabilité à long terme de cette mousse peut être confirmée, on peut supposer que le fait qu'elle contient des retardateurs de flammes, peut potentiellement diminuer son inertie chimique et présenter un risque pour les autres matériaux constitutifs du siège.

Restitution fonctionnelle, muséographique, sensitive et lisibilité de l'intervention

Le choix d'utilisation de cette mousse permettrait...

Une restitution fonctionnelle : ce type de mousse a la particularité d'avoir été spécialement prévue pour accueillir des passagers. Elle permettrait donc aux sièges de la Caravelle d'être à nouveau sollicités par les visiteurs du musée sur du long terme, remplissant ainsi leur fonction primaire.

Une restitution muséographique : cette mousse permettrait une très bonne restitution muséographique en faisant retrouver aux sièges une apparence proche de celle d'origine.

De plus son vaste choix de couleur permet de sélectionner des matériaux présentant des couleurs proches de celles d'origine, si telle est la volonté du musée.

Une restitution sensitive partielle : la densité standard de la mousse PE Ethafoam[®] 4101 est proche de celle des mousses de PUR originellement utilisées et de ce fait donne la possibilité au public de retrouver en partie le confort et les sensations d'assises offertes à l'origine.

Une lisibilité de l'intervention : bien que la couleur et la densité peuvent être choisies pour se rapprocher au maximum des caractéristiques des mousses d'origine, ces paramètres, en les variant, peuvent également servir à rendre lisibles l'intervention de restauration non seulement aux professionnels du musée mais également au public.

²⁸⁸ Dow, 2006, p.1-2 et Dow, 1987, p.4-5

Remarques générales :

La présence d'additifs retardateurs de feu dans la composition de ces mousses, peut susciter des remarques quant à leur légitimité. Il est vrai que l'on préférera toujours utiliser des matériaux avec le moins d'additifs possibles pour autant que ces derniers ne soient pas indispensables pour la stabilité à long terme des matériaux (Ex : anti-oxydants). En revanche, bien qu'ils soient avant tout présents dans la composition des mousses pour satisfaire aux normes de l'aviation, ces additifs peuvent avoir toute leur importance dans la situation présente. En effet, le fait d'accueillir des visiteurs à l'intérieur d'un avion, lui-même stationné en plein air peut être soumis à plusieurs règles de sécurité notamment au niveau du risque incendie²⁸⁹. Le fait d'utiliser un matériau aux propriétés ignifugeantes permettrait de réduire considérablement ce risque, surtout quand on sait que la mousse des sièges est un des matériaux qui se trouve en quantité la plus importante dans l'avion. Par ailleurs, la restauration, bien que devant être lisible pour des questions éthiques et pour éviter toute confusion lors de futures investigations, ne doit en aucun cas dénaturer l'objet et ses matériaux constitutifs. Le fait d'utiliser une mousse, partageant plusieurs propriétés avec le rembourrage d'origine est une manière de respecter son intégrité matérielle. Enfin, ce modèle a la particularité d'avoir été spécialement conçu pour le rembourrage de sièges, qui plus est dans une gamme de produits reconnus et conseillés en conservation-restauration. Deux atouts majeurs qui en font un matériau de remplacement de premier choix²⁹⁰.

La deuxième mousse de PE proposée est un modèle moins spécifique et plus abordable que la précédente. Il s'agit de la mousse Plastazote[®] High Density (HD), qui n'est pas prévue initialement pour le rembourrage de sièges, mais plutôt pour l'emballage/conditionnement des biens culturels et la conception de supports. Ce choix découle de la proposition de Mijanou Gold, d'utiliser une mousse haute densité PE pour remplacer les parties abîmées des sièges contemporains.

5.1.2 Mousse PE Plastazote[®] haute densité**Mousse PE Plastazote[®] HD****Description :**

Mousse réticulée à cellules fermées, de composition monocouche, faite de PE. Cette mousse, très polyvalente, sert à de nombreux usages en conservation-restauration (emballage ; conditionnement ; création de support)²⁹¹. Densité standard : 45 kg/m³.

²⁸⁹ Pour plus de détails, se référer à la législation en vigueur dans le pays.

²⁹⁰ Dow, 2001, p.1-2

²⁹¹ Garcia Gomez, 2011, P.92-93

Avantages :

Chimiquement neutre et inerte (bonne stabilité à long terme) ; surface lisse, non abrasive ; disponible généralement en blanc et noir (autres coloris possibles); excellent amortissement des chocs et des vibrations ; bonne résistance aux produits chimiques (hydrocarbures et composés chlorés notamment); se coupe facilement au cutter et thermosoudable; vaste choix de formats et d'épaisseurs proposés directement par les fournisseurs. Densité de 45kg/m³ ²⁹² Mousse au prix très abordable et davantage répandue que l'Ethafoam®.

Désavantages :

Pas prévue initialement pour le rembourrage (souplesse et résilience limités) et moins bonne résistance mécanique que la mousse Ethafoam®.

Restitution fonctionnelle, muséographique, sensitive et lisibilité de l'intervention

Le choix d'utilisation de cette mousse permettrait...

Une restitution muséographique : l'utilisation de cette mousse permettrait de faire retrouver aux sièges une forme des plus proches de celle d'origine (particulièrement facile à mettre en forme et nombreux fournisseurs pour des coupes sur mesure et en série), permettant au public d'apprécier le visuel des sièges, qui sont l'élément phare de la cabine.

Une lisibilité de l'intervention : la densité de cette mousse étant différente de celle présentée par le rembourrage d'origine, elle est un marqueur permettant la lisibilité de l'intervention, principe important pour les actes de restaurations et particulièrement pour le conservateur en chef du musée.

Ne permet pas...

Une restitution fonctionnelle : ce type de mousse, bien que présentant des capacités d'absorption des chocs pour du mobilier, n'est pas prévue pour être utilisée par des personnes, au risque de se dégrader mécaniquement assez rapidement.

Une restitution sensitive : la haute densité de la mousse ne permet pas de retrouver la souplesse et la sensation d'assise offerte par le rembourrage des mousses de polyuréthane d'origine, au moment de l'utilisation de l'appareil et des sièges. D'autre part certaines mousses Plastazote® peuvent se retrouver dans des densités inférieures, permettant de se rapprocher de cet état.

²⁹² b.Stouls, 2015 [en ligne]

Remarques générales :

L'idée de proposer une mousse ne permettant pas forcément aux sièges d'être utilisés par les visiteurs n'est pas forcément un inconvénient pour le musée. En effet, comme expliqué précédemment, les conservateurs du musée n'étant pas encore clairement fixés sur le sort de l'avion, l'une des pistes sérieusement envisagée est l'ouverture au public du fameux avion de ligne, mais uniquement pour une expérience visuelle muséographique de l'intérieur d'une cabine. Dans cette optique, la souplesse et la résilience offertes par les rembourrages de sièges ne sont pas essentielles. Par ailleurs, dans le choix d'une mousse de PE de haute densité, une vaste gamme de marques présentent également des mousses similaires qui pourraient tout à fait convenir (Volara® ou encore les mousses de PP Micro-foam®²⁹³). Mais les critères de prix, de disponibilité (un nombre élevé de fournisseurs spécialisés en conservation-restauration la propose) et de recommandations des différents professionnels interrogés ont porté mon premier choix sur ce modèle.

Mousse de polyuréthane dernière génération

Le choix de proposer de la mousse PUR pour remplacer celle actuelle peut, au premier abord, paraître paradoxal. Or dans la situation présente, plusieurs éléments justifient la légitimité d'utiliser un tel matériau. Souvent décriée pour leur faible stabilité et inertie chimique, de nombreux professionnels (tapissiers, garagistes, conservateur-restaurateur spécialistes de polymères de synthèse et restaurateurs « traditionnels » de mobilier) s'accordent à dire que les mousses PUR conçues depuis une dizaine d'années, démontrent une bien meilleure stabilité physico-chimique, proche de celles offertes par les mousses polyoléfiniques. Ainsi, deux types de mousse PUR, qui peuvent se soumettre aux exigences du musée sont à citer : les mousses de type éther basse densité, qui sont les produits les plus évolués des mousses de polyuréthane multifonctionnelles créées dès les années 60 et les mousses PUR haute-résilience, avec la Bultex comme modèle haute gamme²⁹⁴.

Choix d'une mousse PUR éther plutôt qu'ester

Il est vrai, qu'en conservation-restauration, la mousse PUR ester est considérée, de manière générale comme plus stable que celle éther, mais cela dépend des usages que l'on veut en faire. Lorsqu'il s'agit d'utiliser la mousse comme matériau d'absorption des chocs pour le transport, il est préférable de choisir une mousse PUR ester, plus rigide et plus stable mécaniquement en cas de choc. Par ailleurs, la mousse PUR de type éther est plus résistante aux processus d'hydrolyses (ceci par les cellules qui la compose, plus volumineuses et donc qui permettent une meilleure évacuation de l'eau et de la vapeur d'eau). Cette mousse est donc préférée à son homologue pour le rembourrage des sièges de

²⁹³ Les mousses de PP présentent une stabilité et inertie chimique similaires aux mousses PE, mais, comme dans le cas de la Micro-foam, on ne les trouve qu'en fine épaisseur (maximum 5 cm d'épaisseur). Rémillard, 1995, p.6-7.

²⁹⁴ Top Mousse, 2015 [en ligne]

véhicules, qui sont soumis plus directement et plus régulièrement aux variations thermohygro-métriques environnementales extérieures²⁹⁵.

Si le choix s'est porté sur des mousses PUR c'est avant tout pour permettre une restitution muséographique et sensitive la plus proche de celle d'origine (retrouver une sensation d'assise similaire à l'état fonctionnel des sièges). Or la mousse PUR ester est plus rigide et moins souple que la mousse PUR éther (identifiée sur les sièges de la Caravelle). Comme cette dernière n'a pas d'intérêt muséographique ni sensitif particulier (à l'inverse d'une mousse PUR de type éther), mieux vaut choisir une mousse de type PE (Etafoam[®] ou Plastazote[®]) qui garantisse assurément une utilisation à long terme. Enfin, c'est également parce qu'elle est bien plus économique d'un point de vue financier et plus accessible sur le marché (représente 90% des mousses PUR mises en vente) et parce qu'elle est la plus utilisée par les selliers et autres artisans réalisant des rembourrages que je préconise la mousse PUR de type éther²⁹⁶.

5.1.3 Mousse PUR (28kg/m³)

Mousse PUR polyéther (28kg/m³)
<p>Description :</p> <p>Mousse à cellules ouvertes alvéolées, plutôt fermes, destinée avant tout pour le rembourrage de galettes de chaises, de banquettes, de selles de motocycles et autres éléments d'assise d'appoint ainsi que pour les éléments de literie (matelas) et les travaux de capitonnage. La mousse PUR polyéther 28kg/m³ est la plus résistante (d'un point de vue mécano-chimique) des mousses de PUR polyéther dites d'entrée de gamme²⁹⁷. Elle est d'ailleurs la plus utilisée par les concepteurs de sièges pour véhicules²⁹⁸.</p> <p>Avantages :</p> <p>Bonne résilience et résistance à la traction ; excellente résistance aux solvants ; qualité supérieure d'amortissement des chocs et des vibrations ; surface douce, non abrasive ; très bon isolant thermique (ne présente pas une surface froide/chaude pouvant être désagréable pour l'accueil du visiteur) ; très abordable d'un point de vue financier et répandue chez les fournisseurs (on la retrouve aussi bien chez des fournisseurs spécialisés qu'en grandes surfaces) ; coupe de mousse selon gabarit souhaité fréquemment proposée par les fournisseurs ; important choix de coloris ;</p>

²⁹⁵ Foam Factory, 2011 [en ligne]

²⁹⁶ Foam Factory, 2011 [en ligne]

²⁹⁷ Plus la densité de la mousse est importante, plus cette dernière sera stable dans le temps, raisons pour laquelle une mousse PUR éther 28kg/m³ est préféré à une de 16 ou encore 25 kg/m³. Mousse Concept, 2015 [en ligne]

²⁹⁸ Mousse et Confection, 2015 [en ligne]

s'assemble facilement à d'autres types de mousses (de densité différente) pour des assemblages en sandwich²⁹⁹.

Désavantages :

Stabilité physico-chimique inférieure aux mousses polyoléfiniques. Mousse potentiellement la moins stable sur le long terme parmi celles proposées³⁰⁰.

Restitution fonctionnelle, muséographique, sensitive et lisibilité de l'intervention

Le choix d'utilisation de cette mousse permettrait...

Restitution fonctionnelle partielle : une des principales caractéristiques de cette mousse est de permettre aux visiteurs de s'asseoir sur les sièges, mais elle se limite à une utilisation occasionnelle (une sollicitation régulière occasionnerait une dégradation mécanique/physique précoce).

Restitution muséographique : permet de retrouver la forme d'origine des sièges.

Restitution sensitive : comme me l'a confié Sylvie Ramel, la sensation d'assise et le confort présentés par une mousse de polyuréthane, ne peuvent se retrouver complètement sur un autre type de mousse. C'est pourquoi seule la mousse de type PUR éther permet une restitution sensitive la plus proche de la mousse d'origine.

Lisibilité partielle de l'intervention : l'utilisation de cette mousse est avant tout pour retrouver au plus près, l'aspect et la consistance du rembourrage à l'époque d'utilisation de l'appareil.

La grande similarité existante entre cette mousse et celle utilisée à la base de la conception des sièges peut être problématique pour discerner l'intervention de restauration.

5.1.4 Mousse PUR haute résilience (HR)

Mousse PUR HR

Description

Mousse polyuréthane haute résilience (PUR HR) de densité 50 kg/m³, à la consistance moelleuse, utilisée pour le rembourrage d'assise de véhicules divers (camping-car, bateau, caravane). Ce matériau est classé M4 (non feu) et peut donc être exploitable dans les lieux publics en toute conformité. Les premiers modèles hautes résiliences de PUR sont apparus dès les années 70³⁰¹.

²⁹⁹ Mousse Concept, 2015 [en ligne]

³⁰⁰ Tétreault, 1993, p. 7 et Tétreault 1992, p.171-172

³⁰¹ Top Mousse, 2015 [en ligne]

Avantages :

Excellente résilience ; très élastique ; grande stabilité et inertie chimique (la meilleure des modèles PUR) ; meilleure portance* et résistance mécanique que la mousse PUR 28 kg/m³ ; très bonne résistance aux solvants ; qualités ignifugeantes ; surface non-abrasive (la plus lisse des mousses proposées) ; prix abordable et facilement disponible sur le marché (avec coupes sur mesures).

Désavantages :

Moins bonne tenue chimique que les mousses de PE et plus chère que les mousses PUR polyéther 28kg/m³ (mais meilleure stabilité et inertie à long terme). Peu d'utilisation connue, également, en conservation-restauration et peu d'informations sur la composition précise de ces mousses par les fournisseurs.

Le choix d'utilisation de cette mousse permettrait...

Restitution fonctionnelle : élaborée spécialement pour une utilisation régulière des sièges, à long terme.

Restitution muséographique : permet de retrouver la forme des sièges lors de la période d'utilisation de l'avion (coupe sur gabarit proposée par de nombreux fournisseurs et artisans)

Lisibilité de l'intervention : sa consistance moelleuse, sa densité et la variété de couleurs qu'elle peut prendre permettent une bonne traçabilité de l'intervention de restauration (facilement différenciable de la mousse d'origine).

Ne permet pas...

Une restitution sensitive : la consistance moelleuse (touché latex) et sa haute densité ne permettent pas de retrouver la sensation d'assise propre aux mousses Polyuréthane de type éther (moyenne densité) et conçues durant dans les années 60-80.

Remarques générales :

Les mousses hautes résiliences sont reconnues plus stables d'un point de vue mécanique/physique que les mousse PUR d'entrée de gamme. En écartant le critère financier, elles seront donc préférées aux autres modèles du type pour un usage en conservation-restauration.

Parmi les mousses hautes résiliences, on peut également citer le modèle haut de gamme Bultex® (38 kg/m³), qui présente des caractéristiques similaires que les mousses Hautes résistances

traditionnelles, avec une stabilité physico-chimique bien meilleure mais avec un coût d'exploitation plus élevé.

La mousse haute résilience HR (50kg/m³) se présente comme un le meilleur compromis entre coûts d'achat et stabilité à long terme parmi les mousse PUR.

Mesures préventives pour l'utilisation de mousse PUR éther

Les mousses PUR éther dernières générations, bien qu'exposées comme stables et inertes par les fournisseurs, présentent toujours un risque potentiel de dégagement de COV (azotés) pouvant entraîner la dégradation à long terme des autres éléments du siège (notamment la corrosion accélérée des parties métalliques). Malgré cela, l'utilisation d'une PUR peut être tout à fait envisagée, selon Sylvie Ramel, pour autant que quelques dispositions soient prises. Outre le fait de préférer une mousse dans les tons clairs/incolores (synonymes de peu d'ajouts d'additifs), une fois les pièces de rembourrages (assises et dossiers) mises en forme, ces dernières peuvent être placées dans des housses agissant comme des pare-vapeur, permettant ainsi d'éviter le contact direct avec les mousses et de limiter au maximum toutes dégradations chimiques importantes³⁰².

Plusieurs matériaux peuvent être envisagés pour l'élaboration de ces pochettes comme du film en PE ou PP. Ces derniers ont l'avantage de présenter une très grande inertie et stabilité chimique, une bonne résistance mécanique, d'être imperméables à l'eau et enfin d'être bon marché³⁰³. Les films de polyester peuvent également être utilisés, mais ces derniers ont le désavantage d'être plus sensibles aux UV, plus électrostatiques et d'être davantage rigides (ce qui peut compromettre la restitution sensitive). Pour éviter également une trop grande concentration des possibles produits volatils nocifs à l'intérieur de la pochette (qui risquerait d'augmenter la vitesse de dégradation de la mousse) il faudrait éviter que ces dernières soient étanches (en y appliquant plusieurs perforations) pour une ventilation naturelle³⁰⁴. On peut également envisager d'appliquer le film barrière uniquement à l'interface métal-mousse, le risque de corrosion du métal étant le plus important. L'utilisation de films dits complexes dont l'inertie et la stabilité sont connus, comme le complexe PE/aluminium permettrait encore une meilleure barrière. De plus, s'il est utilisé sous forme de pochette, ce dernier à l'avantage de protéger le matériau contre les UV³⁰⁵. Bien entendu, toutes ces possibilités ne permettent pas d'éradiquer complètement la problématique des CVO (que cela soit pour la mousse ou pour les autres éléments du siège), mais le fait d'instaurer une situation d'éloignement entre les surfaces permet de réduire considérablement son importance. Les propos de Jean Tétreault, qui vont dans ce sens sont

³⁰² Ramel, 2015, *entretien oral*

³⁰³ Caple, 2011, p.69 et 100 et Boulanger, 2014, *non publié*.

³⁰⁴ Mais, en contrepartie, le film barrière perdra en efficacité.

³⁰⁵ Tétreault, 1993, p.6

encore plus tranchés: « si le matériau n'entre pas en contact direct avec le reste de l'objet, le problème de migration de produits indésirables ne se pose pas »³⁰⁶.

D'autre part, la proposition de mousse de polyuréthane pouvant toujours faire l'objet de controverses (du fait d'un certain a priori dans le domaine de la conservation-restauration vis-à-vis de ce matériau mais aussi par les données techniques des fournisseurs/fabricants parfois lacunaires), l'acquisition de blocs de mousse neuve de polyuréthane éther (modèle standard, densité moyenne) a été faite. Des échantillons provenant de cette dernière ont été prélevés puis placés dans des pochettes *Minigrip*[®] et seront déposés à l'intérieur de la cabine de l'avion, protégés des rayons du soleil. Ceci permettra au personnel de voir comment la mousse, contenue dans une housse intercalaire (représentée par la pochette *Minigrip*[®]) réagit dans le temps, au sein de l'espace qu'elle pourrait être amenée à investir (test de vieillissement du matériau en temps et conditions réelles). Ceci permettra peut-être de lever les doutes sur son adéquation³⁰⁷.



Figure 44 Les échantillons de mousse PUR dernière génération seront disposés sur un des compartiments de rangement de la cabine

Tableau 6 Tableau récapitulatif des caractéristiques des mousses proposées

Récapitulatif des caractéristiques des mousses proposées					
Modèle	Restitution fonctionnelle	Restitution muséographique	Restitution sensitive	Lisibilité de l'intervention	Prix (€/m ³)
Ethafoam [®] 4101					1400
Plastazote [®] HD					900
PUR 28 Kg/m ³					520
PUR HR					810

Légende	
	Permet une restitution ou lisibilité complète
	Permet une restitution ou lisibilité partielle
	Permet une restitution ou lisibilité médiocre
	Ne permet pas une restitution ou lisibilité

Une liste des différents fournisseurs des produits proposés (y compris pour les méthodes de conservation à long terme) est à consulter *en annexe 30, p. 118-119*.

³⁰⁶ Tétreault, 1992, p. 164

³⁰⁷ Ce test des mousses neuves permettra au musée de disposer de son propre support d'informations concernant les qualités de stabilité physico-chimique de la mousse PUR sur lequel il en tirera ses conclusions/observations et tranchera quant à son adéquation ou non dans la situation présente.

Méthode d'avenir : système de coussins d'air

Ce nouveau système ne provient pas du domaine de la conservation-restauration mais a été élaboré par le fabricant de textiles suisses ©Lantal (Lanhenthal) pour desservir le secteur aéronautique. Le dispositif, destiné à prendre place dans l'assise des sièges d'avion passagers au détriment de la mousse habituelle, se présente sous la forme de compartiments remplis d'air logés dans des coussins et alimentés par des moteurs. Ce système pneumatique, testé durant plus de trois ans (avec plus de dix millions d'heures de vol effectuées par 27 avions), a été adopté depuis 2009 par ©SWISS et équipe à l'heure actuelle les sièges 1^{ère} classe et de classe affaire de ses avions long-courriers. Lufthansa en a fait de même à partir de 2012. Outre leur confort et l'économie de poids (et donc de carburant) qu'ils représentent pour les compagnies, c'est leur grande adaptabilité des compartiments d'air aux différents types de structures de sièges existants et leur qualité de stabilité mécanique (testés en temps réels) qui pourraient jouer en leur faveur. Les compartiments d'air pourraient ainsi être placés directement sous la housse d'origine des sièges de la Caravelle 12. Le manque d'informations relatives aux matériaux utilisés dans leur conception³⁰⁸, le peu de recul dont on dispose pour juger de leur efficacité sur le long terme et le fait que le système soit encore en cours de développement font de cette méthode, une piste intéressante à envisager mais qui nécessiterait, sur le long terme, une investigation plus poussée.³⁰⁹

5.2 Autres méthodes

Si un remplacement complet du rembourrage des sièges semble être l'intervention prédominante, d'autres alternatives au caractère moins interventionniste permettent de conserver en partie ou totalement les mousses d'origines. Il s'agit des méthodes de consolidation, de remplacement partiel ou encore de non-intervention directe sur les sièges avec mise en place de mesures de conservation préventives³¹⁰. Chacune de ces dernières ne pouvant s'appliquer pour tous les sièges en raison des différents états de conservation présentés, un traitement hybride, qui consisterait à croiser/combiner les différents traitements en fonction de l'état du siège peut être envisagé. Cette manière de procéder sera également possible dans le cas d'un remplacement total du rembourrage où plusieurs types de mousses pourront être utilisés en fonction du siège et de sa fonction.

Ces méthodes de substitution au remplacement complet du rembourrage actuel s'inscrivent dans les méthodes de conservation à long terme du matériau d'origine, puisqu'elles visent avant tout à préserver la mousse de rembourrage actuelle, *in situ* qui plus est. Ces dernières ont constitué une

³⁰⁸ Le principal défaut présenté par les systèmes dernière génération est qu'il est très difficile de s'informer à leur sujet autre que par le biais de la documentation mise à disposition par le (s) fournisseur(s) (et il n'est pas fréquent, expérience faite, d'obtenir une réponse de leur part). Cette dernière peut bien entendu faire mention d'éléments importants mais sont trahi la plupart du temps par un manque d'objectivité et de précision quant aux informations données. Une certaine prudence est de mise.

³⁰⁹ Schütz, 2012 [en ligne]

³¹⁰ Ces méthodes se basent sur le travail de Mijanou Gold sur les mousses PUR (*Gold, 2004*) et des informations complémentaires qu'elle a pu me faire part en temps réel. Dans mon travail elles seront décrites mais pas mises en œuvre.

grande partie du sujet d'étude de Mijanou Gold, qui a pu les mettre en pratique sur de véritables sièges contemporains, conservés au sein des collections de l'Union Centrale des Arts Décoratifs de Paris.

5.2.1 Remplacement partiel

Ce procédé consiste à remplacer uniquement les parties trop abîmées du rembourrage d'origine (compromettant une restitution muséographique). Il est basé sur des méthodes traditionnelles de regarnissage de sièges anciens. Néanmoins, ces dernières recherchent avant tout la fonctionnalité de l'objet sans réellement vouloir conserver/réutiliser les matériaux d'origines. Or dans la technique de remplacement partiel, la priorité est mise sur le fait de conserver au maximum des preuves historiques de l'objet, soit le rembourrage d'origine³¹¹.

La méthode suit donc deux principes de base, à savoir un remplacement du matériau d'origine limité aux zones les plus dégradées ne permettant plus de satisfaire aux exigences esthétiques du mandant (état de conservation très péjoré : matériau très pulvérulent, faible cohérence, ...) par un fragment provenant d'une nouvelle mousse et placer les parties remplacées dans un sachet récupérateur. C'est donc un principe d'intervention minimale. Pour ce faire, il faut retirer dans un premier temps la housse recouvrant les sièges pour avoir accès au rembourrage. Après avoir repéré les parties à remplacer, il est nécessaires de les retirer (à l'aide d'un cutter) puis de les placer à l'intérieur d'un sachet de type *Minigrip*[®]. Tailler dans une nouvelle mousse (choisir une mousse selon les propositions faites précédemment) la forme correspondant à l'espace laissé par le matériau remplacé. Enfin, concernant les fragments de mousse d'origines récoltés, deux possibilités, existent soit conserver les sachets comme des archives de l'avion et de ses sièges dans les réserves du musée soit de les réincorporer dans le siège avec la nouvelle portion de mousse mise en place. Ainsi les fragments restent directement disponibles pour toutes futures investigations³¹².

5.2.2 Consolidation

Si le matériau d'origine est encore en place, il est important d'imaginer des solutions qui permettent de le conserver sur son emplacement d'origine, avant d'envisager un quelconque remplacement. C'est ce qui motive le choix de recourir à une technique de consolidation des mousses d'origine. L'utilisation de cette méthode peut être limitée par l'état de conservation du matériau (si la mousse est jugée trop dégradée elle ne peut être efficace) mais aussi dans la situation où la mousse constitue également la structure de base du siège (une consolidation n'est pas suffisante pour assurer la stabilité structurelle entière d'un siège)³¹³. Dans la situation présente, c'est une structure métallique indépendante du rembourrage qui constitue la structure des sièges de la Caravelle 12.

³¹¹ Gold, 2004, p.49-51

³¹² Gold, 2004, p.49-51

³¹³ Gold, 2004, p. 54

De nombreux essais de consolidation sur mousse de polyuréthane ont été menés par Mijanou Gold, en collaboration avec le laboratoire de restauration du Musée d'Art Décoratif de Paris. Le principe de cette méthode consiste à injecter une substance à l'intérieur du matériau affaibli afin de le renforcer. La substance liquide introduite se durcit progressivement, au fur et à mesure qu'elle pénètre dans le matériau, ce qui permet d'assurer la cohésion structurelle de la mousse endommagée³¹⁴. Parmi les nombreux produits testés (préalablement sélectionnés pour leur pouvoir d'adhésion, leur souplesse, leur flexibilité, leur compatibilité, leur inertie et leur stabilité physico-chimiques) plusieurs adhésifs se sont révélés appropriés pour une utilisation sûre de la mousse PU. Mais la plus satisfaisante est la solution de *Plexisol P550*[®], un adhésif acrylique possédant une très bonne tenue à long terme, dilué à 40% dans du *White Spirit*[®], ce qui permet à la fois une bonne pénétration à l'intérieur du matériau et un apport de consolidant suffisant. Concernant le mode d'application, c'est l'utilisation d'un Spray Aerosol (*Ecospray*[®]) qui a donné les meilleurs résultats (l'utilisation d'un pinceau est également possible, mais le risque d'abrasion est plus important³¹⁵). Ainsi, on pulvérise l'adhésif sur la surface de la mousse, une face après l'autre (à intervalle de deux semaines). Plusieurs mesures doivent par ailleurs être prises. Le danger de toxicité implique l'usage d'un masque de protection (filtres anti-solvants) et d'effectuer le traitement dans un espace ventilé. Pratiquement parlant, le spray doit être tenu le plus parallèle possible à la mousse³¹⁶.

Les tests de vieillissement accélérés effectués sur les mousses PUR démontrent une augmentation notable de « l'espérance de vie » des mousses consolidées³¹⁷.

5.2.3 Non intervention directe sur l'objet

Le principe de non intervention directe sur les sièges, autrement dit ne pas traiter la mousse de rembourrage actuelle, peut également être envisagé moyennant bien entendu la mise en application de plusieurs dispositions de conservation préventive. En effet, plusieurs raisons peuvent motiver ce choix : les ressources financières du musée ne permettent pas de mettre en œuvre les propositions de remplacement complet, partielle ou encore de consolidation. Les responsables du pôle conservation ne voulant pas que l'on touche à la matérialité des sièges et désirent, malgré l'état de dégradation présenté par le rembourrage, conserver à tout prix les matériaux d'origine dans leur configuration actuelle. Certaines dégradations présentées par les sièges (déformation, marques d'usures/abrasion, déchirures,...) peuvent également se révéler être une source d'informations pertinentes permettant de renseigner, par exemple, sur la manière dont les sièges étaient utilisés ou entretenus³¹⁸.

³¹⁴ Gold, 2004, P.55

³¹⁵ Gold, 2004, p.59-66

³¹⁶ Gold, 2004, p.69

³¹⁷ Gold, 2004, p.71

³¹⁸ Gold, 2004, 72-74

Néanmoins, plusieurs mesures de conservation préventive doivent impérativement être prévues pour appliquer cette méthode, à commencer par interdire l'accès de l'avion aux visiteurs. En effet, la cabine de la Caravelle 12 est dans un tel état de dégradation avancé, qu'envisager l'accueil d'un public pourrait engendrer de nouvelles altérations aussi bien mécaniques que chimiques, accélérant encore davantage la détérioration des mousses de rembourrage³¹⁹. Pour que les visiteurs puissent malgré tout se faire une idée de l'intérieur de la cabine, plusieurs dispositions de type muséographiques pourraient être envisagées comme l'installation d'une paroi transparente (de type *Plexiglass*[®]) devant les entrées de l'avion, qui permettrait la visualisation de la cabine tout en empêchant son accès au public. De plus, pour ralentir la dégradation des mousses, des housses de protection (en film de PE transparent) pourrait être placées sur les sièges, permettant ainsi de les protéger contre la poussière, agent « catalyseur » des phénomènes de dégradation³²⁰. Néanmoins, cette solution a ses limites. Les sièges, bien qu'à l'abri des dégradations anthropiques continueront malgré tout leur processus de dégradation³²¹, jusqu'à une perte totale de cohésion et leur transformation en matériaux poudreux et pulvérulent. Impossible de chiffrer combien d'années les mousses pourront encore maintenir la forme des sièges de manière « acceptable » pour le musée, mais au vu de l'état présenté par la mousse, moins de 30 ans après leur installation, on peut s'attendre à leur désintégration totale dans moins d'une décennie. Cette manière de procéder n'est donc viable qu'à moyen ou court terme.

La lisibilité de l'intervention étant une notion particulièrement importante aux yeux de M. Laurent Rabier, elle motive le choix de conserver un siège dans l'état actuel et à la vue du public, ce qui pourrait rendre réellement compte de la portée de l'intervention de restauration proposée.

Quelle que soit la méthode de traitement appliquée au siège (consolidation, remplacement complet du rembourrage,...) une manière adéquate pour sauvegarder l'ensemble des informations relatives aux sièges serait de conserver, dans des conditions de stockage adaptées pour le long terme, un ou plusieurs sièges dans leur configuration actuelle. Pour cela, il pourrait être envisagé de déplacer le(s) siège(s) (ou même une rangée complète) dans une des parties des réserves du musée³²².

5.2.4 Traitement hybride du rembourrage des sièges

Au vu des différents traitements proposés pour permettre une restitution fonctionnelle, muséographique ou sensitive, on peut imaginer combiner plusieurs méthodes de conservation-restauration pour traiter l'ensemble des sièges. En conservation-restauration, chaque objet nécessite une réflexion globale, permettant de définir ses besoins spécifiques et la méthode de traitement la

³¹⁹ Mtcc et OCIM, 2002, p.21

³²⁰ D'autres mesures de conservation préventives sont énumérées au point...

³²¹ Par ailleurs, on notera qu'en vieillissant, la mousse de polyuréthane tend à se stabiliser. L'émanation de COV corrosifs diminuent progressivement jusqu'à devenir négligeable et la mousse tend vers un pH neutre. Si le processus de dégradation interne de la mousse persiste, le danger diminue pour les autres matériaux qui lui sont annexés.

³²² Pour les recommandations de conservation, se référer à *l'annexe 29, p. 117-118*.

plus adaptée. Bien que les sièges de l'avion semblent provenir d'une même série, les contraintes environnementales subies lors de ces dernières décennies peuvent différer, suivant l'emplacement où il se trouvait à l'intérieur de la cabine (proximité avec les hublots, placés côté est ou ouest...). L'importance de l'état de dégradation du rembourrage peut donc varier selon les sièges (chose que j'ai pu observer *in situ*), les besoins en conservation-restauration également, autrement dit le traitement le plus adapté pour un siège n'est pas forcément le même pour son voisin. Par ailleurs, le nombre très conséquent de sièges à traiter (plus de 140) ne permet pas une étude au cas par cas au sens stricte du terme. C'est pourquoi, pour éviter toutes systématisations des méthodes simples et fiables (pas simple toucher) ont permis de définir le degré de dégradation du rembourrage (se référer au *chapitre 1.5, p.20-21*). Ainsi, les sièges ont pu être regroupés en plusieurs catégories d'état de conservation qui permettent d'orienter les choix du traitement.

Pour le rembourrage des sièges des travées A et F, présentant l'état de dégradation le plus avancé, un remplacement complet semble être l'option la plus adéquate. Pour les travées B et C, qui disposent des mousses avec le meilleur état de conservation, un remplacement uniquement des portions les plus dégradées (tout en conservant le reste de la mousse d'origine) pourrait être opéré. Pour les sièges de la rangée D, présentant un état de conservation intermédiaire, un traitement de consolidation serait envisageable. Par ailleurs, un siège de la travée B et C pourrait être conservé en l'état *in situ* (moyennant les mesures de conservation préventives précitées) ou déplacé dans les réserves du musée (le fait de conserver un siège présentant un rembourrage en meilleur état de conservation maximise les chances de conserver le matériau sur le long terme).

Ce traitement hybride peut également s'appliquer dans le cas d'un remplacement complet du rembourrage des sièges, où plusieurs mousses pourront être utilisées spécifiquement au siège et à sa fonction. Par exemple, pour les sections A et F les plus soumis aux facteurs de dégradations climatiques (UV, phénomène de condensation sur les hublots,...) il faut favoriser la mise en place d'une mousse très stable d'un point de vue physico-chimique en empêchant leur accès par les visiteurs. Une mousse de type Plastazote® s'apprête donc bien à cet usage, tandis que pour les travées B et C, qui pourront être sollicitées par les visiteurs, une mousse de type Ethafoam® (4101) ou PUR haute résilience peuvent être envisagées. Enfin, pour la travée D, une mousse de PUR 28kg/m³ peut être choisie de manière à offrir une restitution sensitive des plus proches de l'origine aux visiteurs, pour autant que leur accès soit restreint, sa tenue mécanique étant davantage limitée.

5.3 Recommandations générales après traitement

Quel que soit le traitement prévu pour le rembourrage des sièges actuels, plusieurs mesures d'ordre préventives peuvent être appliquées une fois celui-ci réalisé.

Lumière	<ul style="list-style-type: none"> - Réduire au maximum la lumière du jour des éclairages utilisés pour l'intérieur de la cabine³²³. Se méfier également des éclairages fluorescents (et autres types d'éclairages intenses)³²⁴. - Envisager l'installation de filtre anti-UV sur les hublots³²⁵ ou de volets intérieurs. - En cas de non-intervention directe sur les sièges, éviter l'utilisation d'une lumière rasante et en préférer une, dispersive, qui permet d'atténuer les altérations et irrégularités de surface³²⁶.
Polluants	<ul style="list-style-type: none"> - Favoriser la circulation de l'air par soufflerie. Par ailleurs, si aucun équipement de régulation des paramètres climatiques n'est installé, favoriser une aération naturelle régulière de la cabine par l'ouverture de ses différentes portes³²⁷ (en dehors des heures d'utilisation de l'avion). - Dépoussiérage fréquent des sièges (sous aspiration douce) pour éviter toutes salissures (qui risque de modifier leur perception visuelle) et que la poussière ne s'incruste sur la surface de l'objet et crée des sites hygroscopiques favorisant la corrosion et l'apparition de micro-organismes³²⁸. Par ailleurs, éviter d'utiliser tout solvant ou solution savonneuse (surtout pour des mousses dégradées) pour le nettoyage, ou encore d'essuyer une mousse qui semble humide (risque de migration de plastifiants). - Limiter la densité maximale de fréquentation quotidienne, autrement dit réguler le nombre de visiteurs par jour ou par heure dans l'avion. Ceci diminuera la quantité de déchets, le taux CO2 environnant et les élévations d'humidité relative et de température ambiante, favorisant ainsi non seulement le bien-être des sièges mais également celui des visiteurs³²⁹. - Recouvrir les sièges les plus fragiles ou ceux situés aux emplacements les plus exposés aux facteurs de dégradations environnementaux (poussières,...) par une housse plastique et limiter voire rendre inaccessible leur accès au public³³⁰.
T° et HR	<ul style="list-style-type: none"> - Envisager l'installation d'un système de traitement d'air à l'intérieur de la cabine (permettant un contrôle de l'humidité et de la température, la filtration des polluants et la ventilation de l'espace)³³¹. L'acquisition de climatiseurs, déshumidificateurs/humidificateurs ou encore de radiateurs (avec thermostat) mobiles

³²³ Eteindre systématiquement quand il n'y a plus de visiteurs. P.15 MTCC

³²⁴ Mttc et OCIM, 2002, p.66

³²⁵ d. Atlantis, 2015 [en ligne]

³²⁶ Gold, p.74

³²⁷ Mttc et OCIM, 2002, p.14

³²⁸ Tétreault, 2003, p.14-15

³²⁹ Mttc et OCIM, 2002, p.21

³³⁰ Mttc et OCIM, 2002, p.21

³³¹ Pour les taux d'HR et de T° recommandé, se référer à l'*annexe 29, p.117*.

	<p>et d'appoint est moins coûteuse et adaptée pour des volumes tels que ceux de la cabine³³².</p> <p>- Si l'occasion se présente, conserver l'avion dans un hangar. Contrairement aux idées reçues, les avions ne sont pas conçus pour séjourner toute leur vie en extérieur et nécessitent de nombreux entretiens tout au long de leur période d'utilisation. Dès que l'appareil est mis hors service et ne dispose plus d'un entretien régulier, ce dernier, malgré la résistance de ses composants à la corrosion (fuselage en alliage d'aluminium et de titane le plus souvent) se dégrade assez rapidement³³³.</p>
--	---

Il est également essentiel de procéder à un contrôle régulier des sièges (monitoring : constat d'état, contrôle des conditions climatiques) pour voir l'évolution de leur état de conservation et déceler d'éventuelles dégradations. Pour ce faire, la fiche de suivi élaborée pour la conservation des échantillons peut également être utilisée à cet effet. Enfin, bien que l'on ne puisse éviter une dégradation provenant d'une sollicitation future des sièges par le public ou pour des reconstitutions cinématographiques (des fonctions que l'avion pourrait être amené à remplir), on peut néanmoins limiter cette dégradation d'ordre anthropique non seulement en régulant l'accès des visiteurs, mais également en rédigeant un document visant à sensibiliser les visiteurs sur la fragilité des sièges³³⁴.

Discussion

Arrivé au terme de ce travail, un regard critique peut être porté sur le travail effectué et tout d'abord sur les difficultés rencontrées. La première a été celle de ne pas pouvoir disposer d'échantillons de la mousse de rembourrage des sièges de l'avion en vue de tester les différentes méthodes de conservation proposées, ce qui a nécessité que je me tourne vers une autre solution. La deuxième difficulté a été les conditions de travail au sein de la cabine à savoir : l'absence d'éclairage, son insalubrité, l'odeur fétide qui y régnait, l'espace confiné, autant de facteurs qui ont rendu le travail *in situ* particulièrement difficile. Le fait également de collaborer avec un musée se trouvant à l'étranger n'est pas toujours évident au point de vue organisationnel. En effet, outre les coûts financiers engendrés par les trajets il était indispensable d'avoir une bonne planification du travail et de prévoir le matériel adéquat nécessaire pour être le plus efficace possible durant le séjour limité, passé *in situ*. Il faut aussi garder à l'esprit que mon travail n'était pas la priorité du musée, ce dernier devant assurer au quotidien la présentation de ses collections au public et le traitement ou la préparation de nombreux autres objets, en vue de futures expositions. Les autres difficultés rencontrées sont dues principalement à l'absence de réponses ou d'informations claires et précises de certains fournisseurs spécialisés que j'avais sollicités concernant certains de leurs produits. Il m'a par exemple été très

³³² Mttc et OCIM, 2002, p.14

³³³ En l'espace d'une année corrosion présente sur composants de l'aile/ encrassement du fuselage,.... Laurent Rabier

³³⁴ Cela est également valable pour le personnel du musée en charge de la conservation de l'avion et des sièges. Mttc et OCIM, 2002, p.21

difficile de connaître la perméabilité de matériaux à la vapeur d'eau et aux autres gaz, données très importantes pour comparer les caractéristiques des différentes méthodes de conservation proposées. Autre exemple : je n'ai pu disposer de données quantitatives précises dans le cas des mousses de substitution proposées, sauf des appréciations qualitatives comme (bonne, excellente,...). Les doses prescrites pour les produits sorbants notamment, sont des ordres de grandeurs qui ne tiennent pas compte de certains paramètres, comme la nature et les dimensions de l'objet conditionné ou encore la durée d'utilisation du produit. Pour remédier à cela, il a été nécessaire de me tourner vers la littérature spécialisée et de poser un regard critique vis-à-vis des indications reçues par les fournisseurs ou les fabricants. Faire preuve d'anticipation a été aussi valable pour les commandes du matériel nécessaire, afin d'être sûr de pouvoir en disposer le jour-J. Malgré ces quelques déconvenues qui ont nécessité des adaptations, aucune d'entre elles n'a réellement bloqué le projet.

Concernant les limites du travail, on peut énumérer le fait que la mousse utilisée pour les tests, bien que partageant des similarités avec celles du rembourrage des sièges, n'est pas identique elle peut donc réagir différemment aux méthodes de conservations testées. Raison laquelle il serait également pertinent que le musée procède, en temps voulu, au test des méthodes proposées avec des échantillons de la mousse d'origine. Toujours à propos des méthodes de conservation proposées, comme la plupart d'entre elles n'ont pas été attestées dans la littérature spécialisée on ne peut donc trop s'avancer aujourd'hui sur leur efficacité, ces dernières nécessitant une observation sur le long terme. Il en va de même pour les mousses de substitution qui n'ont pas encore toutes été testées dans le cadre d'un traitement de conservation-restauration, surtout pour la mousse PUR éther, sur laquelle le doute d'une stabilité à long terme persiste. C'est ce qui m'a motivé à tester le produit en temps réel et dans la cabine. Bien qu'ayant testé la fiche de suivi par mes collègues de la volée, cette dernière n'a pas encore été soumise aux collaborateurs du musée, afin de s'assurer que tous les éléments décrits sont bien compris. Même chose pour les protocoles de retrait de la mousse.

Pour la plupart des résultats obtenus, ceux-ci étaient attendus. Tout d'abord le rembourrage composant les sièges est bien de la mousse PUR, les hypothèses de départ ont donc été confirmées. La conservation-restauration de polymères de synthèse nécessite une prise en considération de nombreux facteurs qui rend sa prise en charge particulièrement complexe. Il s'est aussi confirmé que la mousse est le matériau de substitution le plus adéquat pour un remplacement complet de la mousse de rembourrage des sièges et que plusieurs modèles, accessibles sur le marché sont adaptés pour ce type de traitement. En revanche certains résultats ou constats étaient plus inattendus, comme la légitimité de proposer une mousse PUR de type éther dernière génération (moyennant également quelques mesures préventives) et ceci malgré certains aprioris plus ou moins fondés. Ou encore qu'il existe plusieurs alternatives au remplacement complet du rembourrage et qu'il y a de nombreuses techniques très abordables pour identifier la mousse PUR. A noter également le peu de méthodes spécifiques relatées pour la conservation à long terme d'un matériau aussi répandu que la mousse PUR éther.

On peut également assurer de la fiabilité des résultats obtenus et des propositions faites, malgré certains doutes persistants. En effet, les différentes investigations menées se sont systématiquement appuyées sur l'avis et l'aide de professionnels compétents en la matière (chimistes et spécialistes des méthodes d'analyses, conservateurs-restaurateurs spécialistes des polymères de synthèse et de conservation préventive et également dans le domaine sanitaire), de la littérature spécialisée, d'échanges pluridisciplinaires ayant permis de confronter les avis et de proposer au final des solutions adéquates pour les différents objectifs initialement posés. Quant aux doutes persistants, comme la légitimité de l'utilisation de mousse PUR éther comme matériaux de substitution ou encore du suivi de l'évolution des différentes méthodes proposées, des solutions ont été apportées ou du moins proposées (test d'un échantillon de mousse PUR à l'intérieur de la cabine, fiche de suivi des échantillons,...).

Pour terminer sur une note plus personnelle, le fait d'avoir mené ce projet de conservation-restauration seul, a été pour moi une source d'enrichissement tant professionnelle que personnelle et m'a permis de mettre en pratique, les nombreuses connaissances reçues tout au long de ces trois années. L'apprentissage de prises de décisions, de planifications des actions à mener et de réflexions autour d'un projet global, m'ont donné la mesure du travail, de l'investissement et de l'exigence que le domaine de la conservation-restauration implique. Je reste aujourd'hui et plus que jamais convaincu, que l'on n'épouse pas cette profession pour des raisons purement économiques, encore moins pour le fun mais bien par passion.

Conclusion

A la lumière de ce qui précède les questionnements et objectifs initialement fixés ont été atteints.

Tout d'abord pour la technique de retrait de la mousse endommagée, un protocole de retrait spécifique a été réalisé pour les six types de sièges présents au sein de la cabine. De manière générale, deux configurations étaient présentées : un système d'assemblage avec velcro pour tous les sièges passagers et Stewart, conçu pour être facilement démonté et un autre plus complexe composé de boutons et de housses cousues sur toute leur longueur, nécessitant l'intervention d'un restaurateur spécialisé textile. Il a également été démontré l'importance de prendre en compte non seulement la solution technique de retrait mais aussi les mesures d'ordre sanitaires, sécuritaires et organisationnelles associées, éléments indispensables pour le bien être des collaborateurs du musée et pour l'efficacité du traitement engagé.

Pour appréhender les propositions de méthodes de conservation à long terme des mousses en présence, il a tout d'abord été essentiel d'identifier la nature exacte de ces dernières. Comme le cite Mme Sylvie Ramel : « *Chaque intervention est un cas d'école et nécessite une investigation*

importante incluant l'identification...»³³⁵. La campagne d'identification a nécessité l'application de différents tests et analyses des plus accessibles se portant sur un examen visuel et olfactif du matériau (apparence, odeur, altération), des raisonnements logiques, quelques tests mécaniques (densité, flottaison, abrasion) ou encore une observation sous microscope optique. Pour les plus complexes il s'agit de la mise en œuvre de micro-tests chimiques (notamment de diméthylaminobenzaldéhyde) proposés par France Rémillard, une observation et analyse élémentaire sous MEB-EDS, pour terminer par une analyse FTIR ayant permis de confirmer les résultats obtenus. Ainsi toutes les mousses de rembourrage ont pu être identifiées comme étant des mousses PUR de type éther. Suite à cela, la documentation de la mousse a pu être réalisée, notamment la présentation des processus et facteurs de dégradations spécifiques, parmi lesquels la lumière (UV) et l'oxygène qui en sont les plus importants (dégradation photochimique). Ainsi plusieurs méthodes de conservation à long terme ont pu être proposées, comme une mise en anoxie, une surgélation, des boîtes en carton ou PP associées à des produits sorbants mais également des propositions basiques faisant intervenir l'utilisation de matériaux bien connus en conservation-restauration, telles les pochettes de PE, le papier de soie ou encore le *Tyvek*[®]. Chaque méthode a été mise en œuvre avec le détail de la procédure en images pour permettre au musée de les reproduire en temps voulu. De plus, une fiche de suivi a également été établie pour suivre l'échantillon à long terme, élément indispensable pour juger de leur efficacité.

Concernant les propositions de matériaux de substitution, la mousse s'est avérée être le matériau le plus adapté à un remplacement complet du rembourrage problématique actuel. Quatre types de mousses ont ainsi pu être proposés pour assurer les différentes fonctions que les sièges pourraient être amenés à remplir. Deux sont de types PE, connus pour leur grande stabilité, une permettant avant tout de retrouver la fonctionnalité du siège (Ethafoam[®] 4101) et l'autre davantage pour une restitution muséographique (Plastazote[®] haute densité). Les deux autres sont de type PUR éther dernière génération, choisis avant pour leur restitution sensitive proche de celle d'origine et leur utilisation très répandue pour le rembourrage de sièges. Néanmoins leur utilisation nécessite la mise en place de certaines mesures préventives, comme le fait de les placer dans une housse de PE intercalaire. Malgré la meilleure stabilité des mousses PUR dernière génération, les doutes persistent quant à leur utilisation dans un traitement de restauration. C'est pourquoi un échantillon de cette dernière sera placé à l'intérieur de la cabine pour juger de son adéquation ou non sur le long terme en parallèle des méthodes de conservation. Par ailleurs, des alternatives au remplacement complet de la mousse de rembourrage ont également pu être mises en avant, comme un traitement de consolidation, de remplacement partiel, une non-intervention directe moyennant l'application de mesures préventives ainsi qu'un traitement « hybride » associant les différents traitements et mousses proposés. Des recommandations ont également été émises pour assurer la pérennité des différents traitements choisis.

³³⁵ Ramel, 2007, p.7

Les limites présentées par mon travail résident essentiellement dans le fait qu'à l'heure actuelle on ne peut encore se prononcer sur l'efficacité ou non de toutes les méthodes de conservation proposées. Il en est de même sur le comportement précis des mousses PUR éther dernière génération, placées dans la cabine, celles-ci nécessitant un suivi à long terme. Comme les échantillons utilisés pour tester les méthodes de conservation ne proviennent pas du rembourrage d'origine (le musée n'étant pas disposé à en prélever un échantillon), il est possible que la mousse de ce dernier réagisse différemment aux conditionnements proposés. Raison pour laquelle ces tests devraient être reproduits en temps voulu par le musée avec la mousse d'origine. Enfin des propositions de protocoles de prélèvements ont déjà été établies pour faciliter le travail du musée.

A préciser encore qu'il serait pertinent de réaliser les protocoles de retrait de la mousse et la fiche de suivi avec un des collaborateurs du musée de manière à s'assurer que tous les éléments sont bien compris. Ou encore d'élaborer des devis estimatifs pour l'ensemble des coûts des matériaux engendrés par les traitements de conservation-restauration proposés. Sans oublier un élément important, comme celui de proposer au musée de faire appel aux organismes compétents pour définir le niveau de toxicité présentés par la mousse et la cabine de l'avion et de s'assurer de la conformité des traitements engagés, par un médecin du travail.

Afin de terminer ce travail par une ouverture, toujours en lien avec la problématique traitée, peut-être serait-il approprié de penser déjà aujourd'hui à l'élaboration d'un projet global, intégrant la remise en état des sièges et de la cabine, voire d'autres éléments comme le rembourrage des accoudoirs ou encore le traitement des housses de protection des sièges de la Caravelle 12 ! Mais cela demanderait d'autres investigations... affaire à suivre ?

Et plus spécifiquement à la conservation-restauration des plastiques, au vu de la fréquence à laquelle ils sont utilisés aujourd'hui et le nombre de domaines qu'ils ont investis, il ne fait aucun doute qu'ils représentent une partie importante du patrimoine d'aujourd'hui et de demain. Ils sont les témoins et les symboles forts des technologies du 20 et 21^{ème} siècle et de nos habitudes de consommation. Il est donc légitime qu'ils continuent d'intégrer des collections patrimoniales d'où la nécessité de développer des mesures adéquates pour assurer leur prise en charge au même titre que n'importe quel type de collections.

« Les objets en plastiques représentent un pan important de l'évolution de notre culture matérielle »³³⁶.

³³⁶ Rémillard, 1999, p.4

Bibliographie

Aeroengineer, 2008 [en ligne] : Aeroengineer. « Aviation History : Caravelle 12 ». In *aeroengineer.net* [En ligne]. 2008 [consulté le 05.06.2015]. <http://www.aeroengineer.net/history/caravelle/caravelle2.html>

Aerospatiale, 1980 : Aerospatiale. *Caravelle*. Archives du Musée de l'Air et de l'Espace : documentation relative à la Caravelle, Paris, 1980, *non publié*.

Alufoil, 2014 [en ligne] : European Aluminium Foil Association. « Informations et propriétés relatives à la feuille d'aluminium ». In *Alufoil* [En ligne]. 2014 [consulté le 27.06.2015]. <http://sandwich.alufoil.org/fr/Informations-et-proprietes.html>

Aluminium, 2015 [en ligne] : Aluminium France. « Applications pour le transport ». In *AFA, GFA et ADAL* [En ligne]. 2015 [consulté le 25.06.2015]. <http://www.aluminium.fr/applications/transport>

Atlantis, 2009 : Atlantis France. *Fiche technique : gels de silice*. Atlantis, Noisy-Le-Grand, 2009.

Atlantis, 2010 : Atlantis France. *Fiche technique : Prosorb*. Atlantis, Noisy-Le-Grand, 2012.

Atlantis, 2012 : Atlantis France. *Fiche technique : pochettes et films pour anoxie*. Atlantis, Noisy-Le-Grand, 2012.

Atlantis, 2014 [en ligne] : Atlantis France. « Tablettes de test à oxygène Ageless Eye ». In *Atlantis-France* [En ligne]. 2014 [consulté le 20.06.2015]. <http://www.atlantis-france.com/fr/environnement-anoxie/31-tablettes-de-test-a-oxygene-ageless-eye.html>

a. Atlantis, 2015 [en ligne] : Atlantis France. « Clips de fermeture pour Anoxie ». In *Atlantis-France* [En ligne]. 2015 [consulté le 21.06.2015].

<http://www.atlantis-france.com/fr/environnement-anoxie/25-clips-de-fermeture-pour-anoxie.html>

b. Atlantis, 2015 [en ligne] : Atlantis-France. « Rouleaux d'intissé de polyéthylène Tyvek ». In *Atlantis* [En ligne]. 2015 [consulté le 17.06.2015]. <http://www.atlantis-france.com/fr/emballage/89-rouleaux-d-intisse-de-polyethylene-tyvek.html>.

c. Atlantis, 2015 [en ligne] : Atlantis France. « Papier de soie ». In *Atlantis* [En ligne]. 2015 [consulté le 27.06.2015]. <http://www.atlantis-france.com/fr/emballage/88-papier-de-soie.html>

d. Atlantis, 2015 [en ligne] : Atlantis France. « Film anti-UV auto-adhésif ». In *Atlantis-France* [En ligne]. 2015 [consulté le 02.07.2015]. <http://www.atlantis-france.com/fr/261-film-anti-uv-auto-adhesif.html>

Ashby et Jones, 1991 : Ashby, Michael F. et Jones, David R.H. *Matériaux : Propriétés et applications*. Dunod, Champs-sur-Marne. IUT-Ecoles d'Ingénieurs.

Ashby et Johnson, 2002 : Ashby, Mike et Johnson, Kara. *Materials and Design*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.

Barclay, 2002 : Barclay, Robert. *Supports pour objets de musée : de la conception à la fabrication*. ICC, Ottawa, 2002.

Bertholon, 2012 : Bertholon, Régis. *Fiche Information : Valeurs Culturelles – Alois Riegl et Barbara Appelbaum*. Documents de cours, Neuchâtel, 2012, *non publié*.

Biophy Research, 2012 [en ligne] : Biophy Research. « La spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier ». In *biophy research* [En ligne]. 2012 [consulté le 20.06.2015]. <http://www.biophyresearch.com/technique-analyse/la-spectroscopie-infrarouge-a-transformee-de-fourier/>

Boissonnas, 2014, non publié : Boissonnas, Valentin. *Métaux et alliages anciens (corrosion)*. Cours donnés dans le cadre du module CC1.1, Neuchâtel, 2014, *non publié*.

Bossuat, 2011 : Bossuat, Camille. « Comportement de boîtes de conservation aux variations de température et hygrométrie ambiantes ». *Actualités de la conservation*, n°30, 2011, p.1-6.

Boulangier, 2014, non publié : Boulangé, Bluenn. *Conditionnement des biens culturels*. Cours donnés dans le cadre du module BW3, Neuchâtel, 2014.

Caple, 2011 : Caple, Chris. *Preventive conservation in museums*. Routledge, Londres, 2011.

Carma, 2004 : Centre d'Administration Régional en Matériaux Avancés. *Matériaux faiblement perméables : quelques domaines d'applications*. Carma, Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2004.

Crighton, 1988 : Crighton, John S. « Degradation of polymeric materials ». In The Scottish Society for Conservation and Restauration. *Modern organic materials*. SSCR, Université d'Edimbourg, 14 et 15 avril 1988.

CDG 64, 2014 : Centre de Gestion de la fonction publique territoriale. *Les équipements de protection individuelle*. CDG-64, Pyrénées-Atlantiques, 2014.

CEN, 2012 : Comité Européen de Normalisation. *Conservation des biens culturels-Méthodologie d'échantillonnage des matériaux- Règles générales*. CEN/TC, Bruxelles, 2012.

Coles, 2009 : Coles, Fran. « Challenge of Materials ? A new approach to collecting Modern Materials ». In Keneghan et Egan. *Plastics : Looking at the Future and Learning from the Past*. Archetype Books, Londres, 2009.

Conservation Support System, 2013 [en ligne] : Conservattion Support System. « Ageless RP System Type-K Oxygen Absorber ». In CSS [En ligne]. 2013 [consulté le 20.06.2015]. <http://www.conservationssupportsystems.com/product/show/ageless-rp-system-type-k-oxygen-absorbers/oxygen-absorbers>

Cenpac, 2014 [en ligne] : *Cenpac* [En ligne]. Cenpac, solutions d'emballage, 2014 [consulté le 13.06.2015]. <https://www.cenpac.fr/>

Critt, 2011 [en ligne] : Centre régional d'innovation et de transfert de technologie. In *Critt* [En ligne]. 2011 [consultée le 12.05.2015]. http://www.critt-mdts.com/fichiers/departements/PDF/MEB_WDS_EDS_09.pdf

CV protection, 2015 [en ligne] : CV protection. « Couvre-chaussure en tissu non tissé ». In *CVprotection* [En ligne]. 2015 [consulté le 02.07.2015]. <http://cvprotection.fr/produit/couvre-chaussures-en-tissu-non-tisse/>

Degrigny, 2014, non publié : Degrigny, Christian. *Introduction aux méthodes d'analyses*. Cours donnés dans le cadre du module BN2.4, Neuchâtel, 2014, *non publié*.

Dow, 1987 : Dow Chemical Compagny. *Product and Design Data for Ethafoam brand polyethylene foam*. Dow, Midland, 1987.

Dow, 2001 : Dow Chemical Compagny. *Fiche technique de produit : Ethafoam select*. Dow, Midland, 2001.

Dow, 2006 : Dow Chemical Compagny. *Ethafoam 4101FR Polyéthylène Foam*. Dow, Midland, 2006.

Doyal, 1999 : Doyal, Sherry. « Modern Materials Problems ». In *Modern Materials-Modern Problems, postprints of the Conference organised by the UKIC*. The United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Liverpool, 17 avril 1999.

Dubost, 2014 : Dubost, Bruno. *Les alliages d'aluminium pour l'allégement des structures dans l'aéronautique et la carrosserie automobile*. Académie des technologies, Paris, 2014. Ch.2, Métallurgie des alliages d'aluminium, p.112.

Facon, 2010 : Facon, Patrick. *100 ans d'aviation : Les temps modernes, 1945 à nos jours*. Editions Glénat, Issy-les-Moulineaux, 2010. Atlas. Ch. 2, Caravelle : la renaissance, p.128-133.

Fenn, 1993 : Fenne, Julia. In *Saving the Twentieth Century: The Conservation of Modern Materials*. ICC, Ottawa, 1993, p.341-49.

Flexico 2014 : Flexico. *Sachets refermables : Minigrip®*. Flexico, Hénonville (France), 2014.

Foam Factory, 2011 [en ligne] : The Foam Factory. «Ether and Ester-Based Polyurethane Foam: Characteristics, Differences and Uses ». In *The Foam Factory* [En ligne]. 2011[consulté le 20.06.2015]. <http://www.thefoamfactory.com/blog/index.php/ether-and-ester-based-polyurethane-foam-characteristics-differences-and-uses>

Garcia Gomes, 2011 : Garcia Gomez, Isabelle. *Le soclage dans l'exposition. En attendant la lévitation des objets*. OCIM, Dijon, 2011.

Gold, 2004 : **Gold, Mijanou**. *Les sièges contemporains : le problème de la conservation de la mousse souple de polyuréthane*. Travail de diplôme, Union Centrale des Arts Décoratifs de Paris, 2004, non publié.

Hartmann, 2013 [en ligne] : Hartmann, Gérard. « Sud Aviation (1957-1970) : La plus importante des sociétés françaises de construction aéronautique ». In *Hydroretro* [En ligne]. 2013 [consulté le 28.05.2015]. http://www.hydroretro.net/etudegh/sud-aviation_1957-1970.pdf

Héaulme, 2015 [en ligne] : Héaulme, Olivier. « De l'amiante dans les avions ». In *Scoop It* [En ligne]. 2015 [consulté le 02.07.2015]. <http://www.scoop.it/t/risques-professionnels/p/4040424636/2015/04/01/de-l-amiante-dans-les-avions>

ICC, 2014 [en ligne] : Institut Canadien de Conservation. « La préservation des objets en caoutchouc ou en plastique- Notes de l'ICC 15/1 ». In *ICC* [En ligne]. 2014 [consulté le 08.06.2015]. <http://www.cci-icc.gc.ca/resources-ressources/ccinotesicc/15-1-fra.aspx>

IPCMS, 2004 [en ligne] : Institut de physique et de chimie des matériaux de Strasbourg. « Microscopie électronique à balayage ». In *IPCMS* [En ligne]. 2004 [consulté le 23.05.2015]. http://www-ipcms.u-strasbg.fr/IMG/pdf/memento_meb_eds.pdf

a. ISOPA, 2015 [en ligne] : Association européenne des producteurs de diisocyanates et de polyols. « Histoire des polyuréthanes ». In *ISOPA* [En ligne]. 2015 [consulté le 02.06.2015]. <http://www.polyurethanes.org/fr/qu-est-ce-que-c-est/histoire>

b. ISOPA, 2015 [en ligne] : Association européenne des producteurs de diisocyanates et de polyols. « Chronologie des polyuréthanes ». In *ISOPA* [En ligne]. 2015 [consulté le 02.06.2015]. <http://www.polyurethanes.org/fr/qu-est-ce-que-c-est/chronologie>

J.H.Taylor et W.R. Taylor, 1978 : J.H. Taylor, Michael et W.R. Taylor, John. *Encyclopedia of Aircraf*. Weidenfeld and Nicolson, Londres, 1978. Ch. 1, Aérospatiale SE 210 Caravelle, p.14-16.

ICC, 1994 [en ligne] : Institut canadien de conservation. « Travail de la mousse de polyéthylène et des feuilles de plastique cannelées ». In *ICC* [En ligne]. 1994 [consulté le 12.04.2015]. <http://www.cci-icc.gc.ca/publications/downloads/technicalbulletins/Fra/bt14-Travail-de-la-mousse-de-polyethylene-et-des-feuilles-de-plastique-cannelees.pdf>

Kanaan, 2006 : Kanaan, Charbel. *Thèse de doctorat : Contribution à l'étude de la perméabilité des matériaux polymères multicouches pour l'optimisation des réservoirs pour carburants*. Ecole Nationale supérieure des Industries chimiques, Nancy, 2006.

Lenntech, 2014 [en ligne] : Lenntech BV. « Charbon actif ». In *Lenntech BV* [En ligne]. 2014 [consulté le 18.06.2015]. <http://www.lenntech.fr/charbon-actifhome.htm>

Maekawa, 1998 : Maekawa, Shin. *Oxygen-Free, Museum Cases*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1998.

Maison Salamandre, 2014 [en ligne] : Maison Salamandre, Artisan tapissier-restaurateurs de mobilier. « La mousse polyuréthane ». In *Maison Salamandre* [En ligne]. 2014 [consulté le 02.07.2015]. <http://www.maison-salamandre.com/index.php/travaux-en-images-meuble/les-questions-techniques-restauration/la-technique-du-tapissier/la-mousse-polyurethane.html>

Maunoury, 2012 : Maunoury, Catherine. *Musée de l'Air et de l'Espace : la préservation du patrimoine aéronautique depuis 1919*. Papier de l'administration du Musée de l'Air et de l'Espace, Paris, 2012, *non publié*.

May, 2009 [en ligne] : May, Roland. « Patrimoine(s) et Conservation-Restauration(s) : quelques réflexions pour une théorie globale ». In *Ceroart* [En ligne]. 2009 [consulté le 24.05.2015]. <https://ceroart.revues.org/1235>

Mercier et al., 1999 : Mercier, Jean P. *Traité des matériaux, 3^{ème} édition : Introduction à la science des matériaux*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, 1999.

Metzeler, 2015 [en ligne] : Metzeler. « Terwegs seit 1892-Wechsle zu Jahr ». In *Metzeler sharing independence* [En ligne]. 2015 [consulté le 19.06.2015]. <http://www.metzeler.com/site/fr/about-us/history.html>

Mitsubishi, 2014 : Mitsubishi Gas Chemical Compagny, INC. *RPSsystem, Revolutionary Preservation System*. Mitsubishi, Tokyo, 2014.

Moffatt, 1995 [en ligne] : Moffatt, Elizabeth. « La spectroscopie infrarouge à l'ICC ». In *ICC* [En ligne]. 1995 [consulté le 10.06.2015]. <http://www.cci-icc.gc.ca/discovercci-decouvriricc/scientific-scientifique/51-fra.aspx>

Mondey, 1977 : Mondey, David. *Le monde fascinant des avions*. Gründ, Paris, 1977. Ch.9, Les avions de ligne de l'après-guerre, p.105 et ch.14, Principaux avions, p.174.

Morgan, 1993 : Morgan, John. « A joint project on the Conservation of Plastics by The Conservation Unit and the Plastics Historical Society ». In Grattan (ed.). *Saving the twentieth Century : The Conservation of Modern Materials*. ICC, Ottawa, 1993.

Mousse Concept, 2015 [en ligne] : Mousse Concept. « Type de mousse ». In *Mousses sur mesure* [En ligne]. 2015 [consulté le 23.06.2015]. <http://www.moussesurmesure.com/content/7-type-de-mousse>

Mousse et Confection, 2015 [en ligne] : Mousse et Confection. « Les différentes qualités de mousse ». In *Mousse et Confection* [En ligne]. 2015 [consulté le 28.06.2015]. <http://www.mousseconfection.com/decoupe-de-mousse/qualite-des-mousses/>

MSSMAT, 2013 [en ligne] : Laboratoire MSSMAT. « Le microscope à balayage électronique ». In *MSSMAT* [En ligne]. 2013 [consulté le 20.06.2015]. http://www.mssmat.ecp.fr/home/moyens/microscopie/principes/microscope_electronique_a_balayage

Mttc et OCIM, 2002 : Musées des techniques et cultures comtoises (Mttc) et l'office de coopération et d'information muséographiques (OCIM). *La conservation préventive des collections*. OCIM, Dijon, 2002.

Musée Aeroscopia, 2014 [en ligne] : Musée d'aéronautique Aeroscopia. « Sud-Aviation SE 210 Caravelle 12 ». In *Aeroscopia* [En ligne]. 2014 [consulté le 05.06.2015]. <http://www.musee-aeroscopia.fr/en/node/83>

Musée de l'Air et de l'Espace, 2011 [en ligne] : Musée de l'Air et de l'Espace. « Présentation du musée : Histoire ». In *Musée Air + Espace* [En ligne]. 2011 [consulté le 20.05.2015]. <http://www.museeairespace.fr/presentation/histoire/>

Musée de l'Air et de l'Espace, 2010 [en ligne] : Musée de l'Air et de l'Espace. « Présentation du musée ». In *Musée Air + Espace* [En ligne]. 2010 [consulté le 21.05.2015]. <http://www.museeairespace.fr/presentation/>

Negrini, 2014, non publié : Negrini, Stéphanie. *Health & safety issues in conservation*. Cours données dans le cadre du module BN1.3.1, Neuchâtel, 2014, non publié.

Officiel Prévention, 2014 [en ligne] : Officiel Prévention, santé et sécurité au travail. « Produits ignifuges et non inflammables ». In *officiel-prévention*[En ligne]. 2014 [consulté le 23.06.2015]. http://www.officiel-prevention.com/incendie/produits-ignifuges-et-non-inflammables/detail_dossier_CHSCT.php?rub=106&ssrub=169&dossid=236

OMS, 2015 [en ligne] : Organisation Mondiale de la Santé. « Santé au travail ». In *OMS* [En ligne]. 2015 [consulté le 01.07.2015]. http://www.who.int/topics/occupational_health/fr/

Parisinfos, 2010 [en ligne] : Parisinfos. « Musée de l'Air et de l'Espace : description ». In *Office du Tourisme et des Congrès de Paris* [En ligne]. 2010 [consulté le 21.05.2015]. <http://www.parisinfo.com/musee-monument-paris/71342/Mus%C3%A9e-de-l%27Air-et-de-l%27Espace>

Palissy, 1980 : Palissy, Bernard. *Des Matériaux*. Edition de l'Ecole Polytechnique, Montréal, 1980.

Pellizzi, 2012 : Pellizzi, Eleonora. *Etude du vieillissement des mousses de polyuréthane ester et consolidation par les aminoalkylalkoxysilanes*. Thèse de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne, 2012.

Pichon, 2011 [en ligne] : Pichon, Gaëtan. « Sud-Est SE.210 Caravelle ». In *Avionslegendaires.net* [En ligne]. 2011 [consulté le 06.06.2015]. <http://www.avionslegendaires.net/avion-militaire/sud-est-se-210-caravelle/>

Pinniger, 1994 : Pinniger, David. *Insect Pest in Museum*. Archetype, Londres, 1994.

Pinniger et Winsor, 1998, p.24 : Pinniger, David et Winsor, Peter. *Integrated Pest management*. Museums and Galleries Commission (MGC), Londres, 1998.

Poliuretanos, 2012 [en ligne] : Poliuretanos. « Polyester ». In *poliuretanos* [En ligne]. 2012 [consulté le 04.06.2015]. <http://www.poliuretanos.com.br/Ingles/Chapter1/15Polyester.htm>

a. Préserv'Art, 2010 [en ligne] : Centre de Conservation du Québec. « Les cartons dans le domaine de la conservation préventive ». In *Préserv'Art* [En ligne]. 2010 [consulté le 02.07.2015]. http://preservart.ccq.mcccq.gouv.qc.ca/documents/carton_fr.pdf

b. Préserv'Art, 2010 [en ligne] : Centre de Conservation du Québec. « Les papiers dans le domaine de la conservation préventive ». In *Préserv'Art* [En ligne]. 2010 [consulté le 28.08.2015]. http://preservart.ccq.gouv.qc.ca/documents/papier_fr.pdf

Préserv'Art, 2011 [en ligne] : Centre de Conservation du Québec. « Le montage et l'encadrement des œuvres graphiques et des documents d'archives ». In *Préserv'Art* [En ligne]. 2011 [consulté le 01.07.2015]. http://preservart.ccq.mcccq.gouv.qc.ca/documents/montageencadre_fr.pdf

Préserv'Art, 2014 [en ligne] : Centre de Conservation du Québec. « Papier de soie ». In *Préserv'Art* [En ligne]. 2014 [consulté le 02.07.2015]. <http://preservart.ccq.gouv.qc.ca/ProduitFiche.aspx?NoProduit=P0143>

Quye et Williamson, 1999 : Quye, Anita et Williamson, Colin. *Plastics : collecting and conserving*. NMSE, Londres, 1999.

Ramel, 2007 [en ligne] : Ramel, Sylvie. « Point de vue sur la conservation-restauration des matières plastiques ». In *CeROArt* [En ligne]. 2007 [consulté le 10.05.2015]. <http://ceroart.revues.org/395#tocto1n5>

Rémillard, 1995 : Rémillard, France. *Protection des biens culturels en déplacement. Journées d'étude, Paris 26 et 27 juin 1995*. ARAAFU, Paris, 1995.

Rémillard, 1999 : Rémillard, France. « Les plastiques en garde à vue ». In Quye and Williamson (ed.). *Plastics : collecting and conserving*. NMSE, Londres, 1999.

Reilly, 1991 [en ligne] : Reilly, Julie A. « Celluloid objects : Their Chemistry and preservation ». In *JAIC online* [En ligne]. Journal of American Institute for Conservation, 1991 [consulté le 01.07.2015]. http://cool.conservation-us.org/jaic/articles/jaic30-02-003_indx.html

Rémillard, 2007 : Rémillard, France. *Identification of plastics and elastomers. Miniaturized tests*. Centre de conservation du Québec, 2007.

Reuss, 1997 : Reuss, Margrit. *Imitationen aus frühen Kunststoffen in völkerkundlichen Sammlungen*. Staatliche Akademie der Bildenden Künste, Stuttgart, 1997.

Roquebert, 2002 : Roquebert, Marie-France. *Les contaminations biologiques des biens culturels*. Musée National d'Histoire Naturelle (MNHN), Paris, 2002.

Sagascience, 2008 [en ligne] : Sagascience. « Etude de la cellule et la microscopie ». In *azerttyu* [En ligne]. 2008 [consulté le 24.06.2015]. <http://www.bioch-et-cie.azerttyu.net/docsenligne/Etucell.pdf>

Schaeffer, 2001 : Schaeffer, Terry T. *Effects of light on Materials in collections*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2001. Ch.2, Results of the Literature Search, p.77.

Schütz, 2012 [en ligne] : Schütz, Anja. « Un système de coussin d'air pour des vols confortables ». In Maxon Motor [En ligne]. 2012 [consulté le 23.08.2015]. <http://www.maxonmotor.nl/maxon/view/application/AIR-CUSHION-AB;JSESSIONID=7911F9DEE23E8005F9AF335CB070E6AA?isoCode=fr>

Sciences ouest, 2002 [en ligne] : Revue espace des sciences. « La microscopie optique ». In *sciences ouest* [En ligne]. 2002 [consulté le 22.05.2015]. <http://www.espace-sciences.org/archives/science/13748.html>

Sealed Air, 2013 [en ligne] : Sealed Air. « Mousses de polyéthylène Ethafoam® ». In *Sealed Air* [En ligne]. 2013 [consulté le 01.07.2015]. <http://www.sealedairspecialtymaterials.com/eu/fr/products/ethafoam.aspx>

Selwitz et Maekawa, 1998 : Selwitz, Charles et Maekawa, Selwitz. *Inert Gases in ther Control of Museum Insect Pests*. The Getty Conservation Institute, Lors Angeles, 1998.

SGS, 2014 [en ligne] : SGS Entreprise. « Test du cachemire au microscope optique ». In *SGSgroup* [En ligne]. 2014 [consulté le 19.06.2015]. <http://www.sgsgroup.fr/fr-FR/Trade/Commodity-Trading/Agricultural-Goods/Fibers/Cashmere-Optical-Microscope-Test.aspx>

Shashoua, 2001 : Shashoua, Yvonne. *Inhibiting the deterioration of plasticized poly(vinyl chloride)- a museum perspective*. The Technical University and the National Museum of Denmark, Copenhagen, 2001.

Shashoua, 2006 : Shashoua, Yvonne. « Plastics ». In May et Jones (ed.). *Conservation Science : Heritage Materials*. RSCPublishing, Cambridge, 2006. P.183-193.

Sigma-Aldrich, 2015 [en ligne] : Sigma-Aldrich. « Fiches techniques de produits ». In *Sigma-Aldrich* [En ligne]. 2015 [consulté le 04.07.2015].

a.Stouls, 2015 [en ligne] : Stouls Conservation. « Films, matériaux synthétiques et panneaux légers : Tyvek ». In *Stouls Conservation* [En ligne]. 2015 [consulté le 21.06.2015]. http://www.stouls-conservation.com/FR/boutique.asp?cha_id0=284&cha_id1=294

b.Stouls, 2015 [en ligne] : Stouls Conservation. *Panneaux légers, mousse de calage et Plastazote*. In *Stouls Conservation* [En ligne]. 2015 [consultée le 28.06.2015]. http://www.stouls-conservation.com/FR/boutique.asp?cha_id0=284&cha_id1=291#ancree698

c.Stouls, 2015 [en ligne] : Stouls Conservation. « Produits et accessoires pour la restauration et la conservation : accessoires de protection ». In *Stouls* [En ligne]. 2015 [consulté le 01.07.2015]. http://www.stouls-conservation.com/FR/boutique.asp?cha_id0=393&cha_id1=916

Sud-Aviation, 1969 : Sud-Aviation, Direction Générale. *Caravelle 12B : Note 118/DCT/T/69*. Archives du Musée de l'Air et de l'Espace : Direction des contrats, Paris, 1969, *non publié*.

Sud-Aviation, 1970 : Sud Aviation. *SE 210 Caravelle 12*. Direction des Ventes de Sud-Aviation, Paris, 1970.

SUVA, 2015 [en ligne] : Caisse Nationale Suisse d'Assurance Accident [En ligne]. SUVA, 2015 [17.06.2015]. <http://www.suva.ch/fr/>

Szycher, 1999 : Szycher, Michael. *Szycher's Handbook of Polyurethanes*. CRC Press LLC, Floride, 1999.

Techniques de l'ingénieur, 2014 [en ligne] : Techniques de l'ingénieur. « Mousses de polyuréthanes (Mousses PUR) : élaborations et propriétés ». In *techniques de l'ingénieur* [En ligne]. 2014 [consulté le 04.07.2015]. <http://www.techniques-ingenieur.fr/fiche-pratique/materiaux-th11/abc-plastiques-dt50/mousses-de-polyurethanes-mousses-pur-elaborations-et-proprietes-0986/>

TechTendance (2002) : TechTendance. *Les matériaux en mousse organiques et métalliques*. Innovation 128, Paris, 2002.

Tétreault, 1992 : Tétreault, Jean. « Matériaux de construction, matériaux de destruction ». In *La conservation préventive*. ARAAFU, Paris, 1992, p.163-175.

Tétreault, 1993 : Tétreault, Jean. *Guide de sélection des matériaux pour l'exposition, la mise en réserve et le transport*. Institut Canadien de conservation, Ottawa, 1993.

a.Tétrault, 2003, ch. gel de silice : Tétrault, Jean. *Révision d'utilisation du gel de silice*. ICC, Ottawa, 2003.

b.Tétrault, 2003 : Tétrault, Jean. *Polluants dans les musées et les archives : évaluation des risques, stratégies, de contrôle et gestion de la préservation*. ICC, Ottawa, 2003.

Tétreault et Williams, 1992 : Tétreault, Jean et Williams, R.Scott. *Materials for Exhibit, Storage and Packing*. Institut Canadien de conservation, Ottawa, 1992.

Top Mousse, 2015 [en ligne] : Top Mousse. « Choisir sa mousse ». In *Topmousse* [En ligne]. 2015 [consulté le 25.06.2015]. <http://www.topmousse.net/choisir.php>

Toutes les couleurs, 2014 [en ligne] : Toutes les couleurs. « Les couleurs : jaune ». In *toutes-les-couleurs* [En ligne]. 2014 [consulté le 25.06.2015]. <http://www.toutes-les-couleurs.com/couleur-jaune.php>

Thomson, 1986 : Thomson, Garry. *The Museum Environment. Second Edition*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1986.

Thompson, 2013 : Thompson, Rob. « Techniques de mise en forme : Moulage par injection ». *Forum des technologies*, n°185, avril 2013, p.30-33.

Trotignon et al., 1998 : Trotignon, Jean-Pierre et al. *Matières Plastiques : Structure-propriétés, mise en œuvre, normalisation*. Nathan, Paris, 1998. Afnor.

UNESCO, 2014 [en ligne] : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture. « Convention concernant la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel : article 4 ». In *UNESCO* [En ligne]. 2014 [consulté le 26.05.2015]. <http://whc.unesco.org/fr/conventiontexte/>

UTZ, 2002 : Georg UTZ Group. *Data Sheet : Container Rako*. UTZ, Zürich, 2002.

Van Oosten, 2002 : Van Oosten, Thea B. « A survey of problems with early plastics ». In Mosk et Tennent (ed). *Contributions to Conservation*. ICN, 2002.

a.Waller, 2014 [en ligne] : Waller, Christophe. « Barrier Films ». In *Long life of art* [En ligne]. 2014 [consulté le 26.06.2015]. <http://www.cwaller.de/english.htm?barrierfoils.htm~information>

b.Waller, 2014 [en ligne] : Waller, Christophe. « Prosorb Humidity Stabilizer ». In *Long life of art* [En ligne]. 2014 [consulté le 27.06.2015]. <http://www.cwaller.de/english.htm?eprosorb.htm~information>

Wiles, 1993 : Wiles, David M. « Changes in Polymeric Materials with Time ». In Grattan (ed.). *Saving the twentieth Century : The Conservation of Modern Materials*. ICC, Ottawa, 1993.

Williams, 1997 : Williams, Scott. *Notes de l'ICC 15/1 : Détérioration des objets en caoutchouc et ou en plastique*. Institut Canadien de Conservation, Ottawa, 1997.

Whirlpool, 2015 [en ligne] : Whirlpool. « Conservation parfaite de vos aliments avec les surgélateurs de whirlpool ». In *whirlpool* [En ligne]. 2015 [consulté le 20.06.2015]. http://www.whirlpool.be/fr_BE/produits-1/r%C3%A9frig%C3%A9ration-et-surg%C3%A9lation-2/surg%C3%A9lateurs-3/102201016/

Entretiens et échanges courriels

Binet, 2015, échange courriel : Binet, Christian. Chargé d'enseignement à la HEArc C-R et à l'INP. Echange courriel du 22.04.2015.

Brambilla, 2015, entretien oral : Brambilla, Laura. Adjointe scientifique à la RA&D. Entretien oral du 15.05.2015

Gerber, 2015, entretien oral : Gerber, Patrick. Hygiéniste et inspecteur du travail dans le canton de Neuchâtel. Entretien oral du 29.05.2015.

Gueniat, 2015, *entretien oral* : Gueniat, Joël. Directeur et administrateur chez ©LabTox SA. Entretien oral du 12.05.2015

Pittet, 2015, *entretien oral* : Pittet, Martine. Diplômée Master en français-histoire. 25.04.2015.

Pretalli, 2015, *échange courriel* : Prétalli, Sandros. Garagiste-Carrossier. Echange courriel du 21.05.2015.

Rabier, 2014, *entretien oral* : Rabier, Laurent. Conservateur responsable de la collection d'aéronefs du Musée de l'Aire et de l'Espace du Bourget (Paris). Entretien oral du 29.12.2015.

Rabier, 2015, *entretien oral* : Rabier, Laurent. Conservateur responsable de la collection d'aéronefs du Musée de l'Aire et de l'Espace du Bourget (Paris). Entretien oral du 27.04.2015.

Ramel, 2015, *entretien oral* : Ramel, Sylvie. conservatrice-restauratrice spécialiste des matériaux modernes. Entretien Oral du 20.04.2015

Seghairia, 2015, *échange courriel* : Seghairia, Françoise. Professeur chargée d'enseignement à la HES-Soins infirmier. Echange courriel du 27.05.2015.

Crédits photographiques

Sauf mentions contraires, les photographies et illustrations présentées sont la propriété de Baptiste Prétôt et de la HEArc C-R de Neuchâtel : ©HECArc C-R, B.P

Table des illustrations

Figure 1 Entrée principale du Musée de l'Air et de l'Espace de Paris.	7
Figure 2 La Caravelle 12 du Musée de l'Air et de l'Espace (Paris), aux couleurs d'Air Provence.....	11
Figure 3 Vue l'intérieur de la cabine passagers (à gauche) et celle de pilotage (à droite).....	13
Figure 4 Siège passager avec schémas de ses dimensions (en cm)	14
Figure 5 Siège passager "Luxe" avec schémas de ses dimensions	16
Figure 6 Pertes de revêtement de l'ossature en métal	17
Figure 7 Housse tachée et gerçures du revêtement des accoudoirs.....	17
Figure 8 Fientes d'oiseaux sur la housse.....	17
Figure 9 Cendrier avec marques d'enfoncement.....	17
Figure 10 Configuration du rembourrage en mousse des sièges passagers modèle 1	18
Figure 11 Configuration du rembourrage en mousse des sièges passagers modèle 2	19
Figure 12 Configuration du rembourrage en mousse des sièges passagers modèles 2.....	19
Figure 13 Illustration de la pulvérulence de certaines mousses	21
Figure 14 Etiquette présente sous le coussin d'assise de sièges passagers	25

Figure 15 Mousse se délitant, avec présence d'une fissure cuboïde	26
Figure 16 Le test de flottaison nécessite que peu de moyens.....	27
Figure 17 Tous les tests se sont révélés positifs.....	30
Figure 18 Echantillon TI.05.15 (x20) et Figure 19 Structure en nid d'abeille propre aux mousses PUR	31
Figure 20 Echantillon TI.05.15 vu sous MEB et spectre EDS associé.....	32
Figure 21 Spectre FTIR caractéristique des mousses PUR éther	33
Figure 22 Evolution des sièges d'avion (Deutsches Technikmuseum)	35
Figure 23 Réaction de synthèse de l'uréthane.....	36
Figure 24 Le TDI et le MDI sont les isocyanates les plus courants.....	36
Figure 25 Polyol polyester (à gauche) et polyéthylène glycol (à droite)	37
Figure 26 Méthode de mise en œuvre par coulée souple	40
Figure 27 Décoloration et perte des propriétés mécaniques de la mousse	41
Figure 28 Délitement de la mousse entraînant d'importantes zones lacunaires.....	42
Figure 29 Porte de secours situé à l'avant de l'appareil pouvant être ouverte	46
Figure 30 Vues générales du siège passager	49
Figure 31 1 ^{ère} étape du démontage : retirer l'assise du siège.....	49
Figure 32 2 ^{ème} étape : retirer la housse de l'assise	50
Figure 33 Descendre la tablette pour avoir plus facilement accès aux velcros	51
Figure 34 Retirer la housse du dossier en tirant la partie inférieure du coussin vers l'avant.....	51
Figure 35 Une fois la housse retirée, la mousse peut être enlevée à son tour	51
Figure 36 Conclure l'opération en retirant la pochette arrière.....	52
Figure 37 Méthode 1 : résultat final	55
Figure 38 Méthode 2 : résultat final	58
Figure 39 Méthode 3 : résultat final	59
Figure 41 Méthode 4 : résultat final	62
Figure 43 Méthode 5 : résultat final	65
Figure 45 Méthode 6 : résultat final	65
Figure 46 Méthode 7 : résultat final	66
Figure 47 Les échantillons de mousse PUR dernière génération seront disposés sur un des compartiments de rangement de la cabine	82
Tableau 1 Le <i>Proisorb</i> ® est le produit le plus adapté aux conditions d'hygrométrie recherchées pour la mousse PUR.....	61
Tableau 2 <i>Tableau comparatif des niveaux de perméabilité à l'eau et aux gaz des boîtes dites "plastiques"</i>	63
Tableau 3 <i>Comparatif entre la perméabilité à la vapeur d'eau des sachets Minigrip® et les boîtes PEHD à épaisseur égale (50 µm)</i>	65

Tableau 4 Comparatif des qualités tampon de différents matériaux.....	67
Tableau 5 Tableau récapitulatif et comparatif des caractéristiques des différentes méthodes.....	68
Tableau 6 Tableau récapitulatif des caractéristiques des mousses proposées.....	82

Glossaire

Adjuvant : se dit d'un produit que l'on ajoute dans la composition d'un autre pour en améliorer ou changer certaines propriétés.

Affadissement : état de dégradation mécanique avancé se caractérisant par une perte de cohésion du matériau.

Collant : se dit d'une substance qui peut adhérer à la surface d'une autre par contact.

Composés volatils organiques (COV) : gaz organiques qui s'évaporent plus ou moins rapidement à température ambiante, se retrouvant ainsi dans l'air.

Coussin d'assise ou de dossier : un coussin d'assise ou de dossier se compose de la housse de protection et de la mousse de rembourrage.

Cuboïde : se dit d'une altération de forme géométrique cubique.

Elastomère : polymère d'origine naturelle ou synthétique reconnaissable à leur grande élasticité.

Extrudé : procédé de mise en forme des thermoplastiques, qui consiste à pousser la matière chauffée à travers une filière.

Hydrolyse : décomposition d'une substance par l'eau par l'intermédiaire des ions très réactifs H_3O^+ et OH^- issus de la dissociation de l'eau.

Hygroscopique : se dit d'un corps qui a des affinités avec l'eau.

Ignifugeant : composé ajouté à un matériau macromoléculaire pour supprimer ou atténuer son aptitude à la combustion.

Inerte : qui ne change pas et qui ne suscite pas de changements ; non réactif.

Lignine : partie de la structure cellulaire du bois qui, si elle n'est pas enlevée chimiquement, entraîne la décomposition de tous matériaux avec lequel elle entre en composition.

Mousse PUR : le terme mousse PUR désigne une mousse souple de polyuréthane.

Mousse Latex : désigne des mousses en latex polymérisé ou caoutchouc vulcanisé utilisées autrefois (avant les années 40) dans la composition des sièges de véhicules de transport.

pH : échelle indiquant le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une substance ou d'un matériau (1-6.9 : acide, 7 : neutre, 7.1-14 : basique).

Plastiques : Terme familier pour mentionner les polymères de synthèses.

Poisseux : se dit d'une substance qui peut adhérer à la surface d'une autre par contact, mais dans une moindre mesure qu'une « collante ».

Polluant : gaz ou particule solide qui a des effets connus sur les biens culturels (CO₂, SiO₂,...).

Polymère : molécule constituée d'une répétition de mêmes monomères unis les uns aux autres par des liaisons covalentes.

Portance : capacité d'un matériau à résister à une charge ou force exercée perpendiculairement sur sa surface.

Pulvérulent : se dit d'un matériau qui se réduit facilement à l'état de poudre par simple frottement ou toucher.

Radiation ultraviolet (UV) : radiations invisibles constituant le prolongement du violet du spectre chromatique. Elles sont une cause de dégradations photochimiques et trouvent leur source dans le rayonnement solaire et la lumière fluorescente.

Rangée : alignement des sièges dans le sens horizontale (par rapport à l'avant de l'avion).

Réticulation : passage d'un polymère d'un état où les macromolécules sont indépendantes à un état où elles sont reliées par des liaisons chimiques.

Résilience : propriété mécanique d'un matériau de retrouver sa forme après avoir été comprimé ou déformé.

Rugosité : dont la surface présente des aspérités, des irrégularités et qui est rude au toucher.

Sorbant : matériau qui a une fonction de sorption, c'est-à-dire qu'il capte certains éléments présents dans l'air ambiant et les emprisonne (les rend inactifs !).

Souplesse : capacité d'un corps à se déformer facilement.

Travées : alignement des sièges dans le sens vertical (par rapport à l'avant de l'avion).

Annexes

« Conservation d'échantillons de mousse de sièges d'un ancien avion Caravelle 12 et propositions de matériaux/dispositifs de remplacement »

Mémoire présenté par : Baptiste Prétôt

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation

Objets scientifiques et techniques

2014-2015

Remise du travail : 20.07.2015

Jury: 24-25.08.2015

Nombre de pages : 123

Sommaire

Annexe 1 : Historique du Musée de l’Air et de l’Espace.....	3
Annexe 2 : Historique des avions Caravelles	4
Annexe 3 : Récapitulatif des caractéristiques techniques de la Caravelle 12.....	9
Annexe 4 : Schémas de la cabine de la Caravelle 12 du Bourget.....	11
Annexe 5 : Photographies des altérations de la cabine	15
Annexe 6 : schéma des parties constitutives d’un siège d’avion	16
Annexe 7 : Description des sièges (co)pilotes et Stewart.....	17
Annexe 8 : Caractérisation des mousses en présence.....	22
Annexe 9 : Description du rembourrage en mousse des sièges (co)pilotes et Stewart	29
Annexe 10 : Protocole d’échantillonnage pour les tests d’identification et tableau récapitulatif des échantillons prélevés.....	30
Annexe 11 : Tests de flottaison et de densité	41
Annexe 12 : Tableau chronologique de l’apparition des quelques « plastiques »	45
Annexe 13 : Questionnaire d’identification de la mousse PUR	46
Annexe 14 : Mesure du pH des vapeurs de combustion.....	46
Annexe 15 : Test au <i>(diméthylamino)benzaldéhyde</i>	49
Annexe 16 : Observation sous microscope optique	52
Annexe 17 : Observation sous MEB et analyse EDS.....	57
Annexe 18 : Analyse FTIR	61
Annexe 19 : Code de couleur des mousses.....	67
Annexe 20 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques de la mousse PUR éther ...	67
Annexe 21 : EPI recommandé pour le retrait des mousses de rembourrages	68
Annexes 22 : Moyens logistiques inhérents au retrait des mousses de rembourrage	70
Annexe 23 : Protocole de retrait des sièges Stewart et (co)pilotes	72
Annexe 24 : Tableau récapitulatif des facteurs de dégradation et leurs effets sur la mousse PUR éther	78
Annexe 25 : Fiche de suivi des échantillons	79

Annexe 26 : Présentation de la mousse « testée » et propositions de protocoles de prélèvements....	88
Annexe 27 : procédure de mise en œuvre des méthodes de conservation	91
Annexe 28 : Calcul des doses de produits pour les méthodes de conservation 1, 2 et 3	113
Annexe 29 : Recommandations pour le stockage et la manipulation des échantillons tests	117
Annexe 30 : Liste de fournisseurs	118
Crédits photographiques	120
Table des illustrations	120

« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »

Date et signature :

Annexe 1 : Historique du Musée de l'Air et de l'Espace

Le site du Bourget est connu pour avoir vu défiler des grands noms de l'aviation comme Lindbergh (qui, en 1927, fut le premier pilote à relier sans escale et en solitaire New-York à Paris) et Costes Bellonte (qui effectue la même liaison mais dans l'autre sens, c'était en 1930), ou encore pour accueillir tous les 2 ans et depuis 1953, le fameux Salon International de l'Aéronautique¹.

L'histoire commence en 1915, lorsque les terrains du Bourget et de Dugny sont réquisitionnés, puis transformés en aéroports militaires pour les besoins de la guerre où de nombreux appareils militaires passeront par cette base. C'est après la 1^{ère} Guerre mondiale, en 1919, qu'Albert Caquot (Chef du service Technique Aéronautique) réussit à convaincre le ministère de la Guerre, de créer un pôle dédié à la conservation des appareils aéronautiques. La principale motivation tenait au fait qu'à l'époque l'avion était le symbole de la modernité technique². De plus, avec la fin du conflit, les avions en activité sont nombreux³, le moment était donc opportun pour créer le musée. Les premiers biens récoltés sous l'impulsion du capitaine Hirschauer, alors chargé de l'enrichissement des collections, sont tout d'abord acheminés à Issy-les-Moulineaux, situé aux portes de Paris. Suites aux crues de la Seine de 1920-1921 les collections seront acheminées d'urgence à Chalais Meudon, dans une ancienne fabrique de nacelles de ballons. C'est d'ailleurs sur ce même site, en proche banlieue parisienne, que sera inauguré officiellement le 23 novembre 1921 le Musée de l'Air. Ce dernier compte rapidement une foule d'objets du domaine aéronautique (avions, moteurs,...) témoins des origines de l'aviation et de la Guerre. Mais un problème récurrent apparut rapidement aux yeux des responsables des collections : le manque de place pour stocker l'ensemble de leurs collections, en constante augmentation⁴. C'est pourquoi, dès 1937 de nouveaux bâtiments furent construits. En parallèle, durant l'entre-deux-guerres, un grand nombre des infrastructures de l'aéroport militaire du Bourget seront reconverties pour l'aviation civile, avec notamment la création, en 1919, d'une ligne Londres-Bruxelles. Pendant la 2^{ème} Guerre mondiale, le site du Bourget sera occupé par les allemands, puis bombardé et reconstruit par les alliés à la fin du conflit. Dès 1945, il servira notamment de base de rapatriement pour plus de 40'000 déportés de la Guerre⁵.



Figure 1 Le terrain entre Dugny et le Bourget furent réquisitionnés pour les besoins de la Guerre.

¹ Maunoury, p.2 et 3

² Maunoury, 2012, p.1 *non publié*

³ Le nombre d'avions produit s'est vu multiplié par 20 pendant la 1^{ère} Guerre Mondiale ! Maunoury, 2012, p.1

⁴ Maunoury, 2012, p.2

⁵ Musée de l'Air et de l'Espace, 2011 [en ligne]

C'est seulement à l'ouverture de l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle en 1973 et poussé par une volonté politique d'offrir aux collections du Musée de l'Air un site digne de ce nom, que les collections du Musée de l'Air et de l'Espace déménageront dans les bâtiments de l'aéroport du Bourget, le trafic aérien y étant devenu moins important. Les collections investiront progressivement les hangars désaffectés de l'aéroport, dont les activités se porteront désormais sur l'aviation d'affaire⁶. Par ailleurs, les objets dits « spatiaux » feront peu à peu leur apparition au sein des collections, ce qui vaut au musée de porter le nom de Musée de l'Air et de l'Espace. Il faudra attendre 1975 pour voir l'ouverture des premiers espaces d'expositions au public. Par la suite de nouvelles halles d'expositions verront régulièrement le jour, jusque vers la fin des années 90 avec notamment l'ouverture, en 1987, de la Grande Galerie. Cette dernière, implantée sur l'ancienne aérogare abrite certains des plus anciens appareils volants et avions issus des deux grandes Guerres. Plus récemment, des travaux d'agrandissement et de rénovation des espaces d'expositions ont été réalisés comme l'ouverture d'une salle d'exposition dédiée aux ballons et aux dirigeables (1995), la rénovation du Halle de l'Espaces et du Planétarium (2000) ou encore la création de l'exposition permanente Saint-Exupéry (2007) et de la nouvelle exposition permanente « les As de 14-18 » (2009) et enfin l'acquisition, la même année, d'une Alouette III. On notera également l'ouverture au public du Boeing 747 et en 2003, l'acquisition du Concorde Sierra Delta⁷.

Des travaux de rénovation, notamment de la façade Est du musée sont actuellement menés et devraient prendre fin d'ici 2017. Un nouvel espace d'exposition dédié à l'unité de combat de l'armée française « Normandie-Niemen » verra aussi le jour⁸.

Annexe 2 : Historique des avions Caravelles

Dès la fin de la 2^{ème} Guerre Mondiale, l'industrie de l'aviation française a connu un développement important. De nombreux programmes d'avions de lignes émergent, vivement soutenus par le gouvernement⁹. C'est ainsi qu'au début des années 60, le secrétariat général de l'aviation civile (SGAC) lança un cahier des charges pour la conception d'un avion de ligne à réaction permettant l'accueil d'une soixantaine de passagers et présentant une vitesse de croisière supérieure à 600 km/h. Plusieurs sociétés se lancèrent dans le concours et c'est finalement la société nationale de construction aéronautique du Sud-Est (SNCASE)¹⁰ qui présenta en 1952, le projet le plus abouti...l'ère Caravelle¹¹ était née.

Le premier prototype, le X-210, comprenait 3 turboréacteurs Atar (de la firme SNECMA) et fut bientôt déclassé par un deuxième (F-WHHH) doté de réacteurs Rolls-Royce plus puissants, dont deux

⁶ L'aéroport de Paris-Le Bourget est le premier aéroport d'affaires européen. Maunoury, 2012, p.3

⁷ Musée de l'Air et de l'Espace, 2011 [en ligne]

⁸ Rabier, 2015, *entretien oral*

⁹ Facon, 2010, p.128

¹⁰ En 1957, la fusion de la SNCASE avec la SNCASO (son homologue du sud-ouest) donne naissance à la compagnie Sud-Aviation, et c'est en 1970 que cette dernière fusionne avec Nord Aviation pour former la Société Nationale Industrielle Aérospatiale (plus connue sous le nom d'Aérospatiale). Hartmann, 2013 [en ligne].

¹¹ Ce nom fait référence aux fameuses Caravelles de Christophe Colomb. Musée Aeroscopia, 2014 [en ligne]

seulement suffisaient à l'avion pour voler. Au début de l'année 1953 déjà, un premier contrat fut signé avec le Secrétariat de l'Etat à l'Air, qui donnera naissance quelques années plus tard aux SE.210 Caravelle, premiers modèles de série qui apportèrent avec eux une véritable révolution¹². En effet, les deux réacteurs Rolls-Royce Avon étaient montées à l'arrière de l'appareil, de chaque côté du fuselage. Cette particularité qui assure aux ailes un rendement aérodynamique optimal permettait également de diminuer les nuisances sonores à l'intérieur de la cabine des passagers¹³. Cette technique fut très largement copiée par la suite. Plusieurs modèles de préséries furent conçus par SNCASE, dans leurs usines situées à Toulouse et passèrent de nombreux tests afin de pallier aux problèmes rencontrés par son prédécesseur, le Comète, dont les concepteurs des Caravelles s'étaient inspirés (notamment pour le fuselage). Le F-WHHH effectue son premier vol d'essai en mai 1955 avant d'être présenté en juin lors du salon du Bourget¹⁴. Toutes les conditions de sécurité furent remplies haut la main et c'est en 1956 que SNCASE reçut les certificats de navigabilité, l'autorisant à transporter des passagers (seulement en 1958 pour opérer sur le sol américain) et Air France commanda dans la foulée 12 premiers appareils¹⁵.

Fin 1956, SNCASE continue son opération séduction en effectuant de nombreux vols de démonstrations dans les grandes villes d'Europe puis en Amérique du Sud et enfin aux USA. Fort de son succès, la compagnie voit les commandes affluées ; Scandinavian Airlines System (SAS) commande six appareils (avec une option sur près d'une vingtaine) tandis que Varig (Brésil) et Air Algérie en commandent 2 chacun. En 1959, les premières Caravelles de série I sortirent d'usines et furent envoyées respectivement à Air France et SAS. En plus d'être le premier avion de transport à réaction français, la Caravelle fut le premier jet* moyen-courrier à être utilisé sur des lignes européennes¹⁶.

Au fil des commandes, les réacteurs Rolls-Royce Avon installés sur les appareils sont toujours plus performants, passant des Caravelles 1 (dotées de réacteurs Avon MK 522 de stade II) à des Caravelles de type 3 (munies de réacteurs MK 527 de stade III). Air France fut la société qui employa le plus de Caravelles et bientôt Swissair, Alitalia et Tunis Air comptèrent parmi les clients. Au-delà de leur réussite mondiale, les Caravelles connurent un succès mitigé aux Etats-Unis, marché plus que convoité. Malgré un projet de collaboration avec Douglas Aircraft (célèbre constructeur aéronautique américain) devant aboutir sur la construction de 20 Caravelles de type 7, ce dernier se rétracta pour créer ses propres avions de ligne¹⁷. De son côté, Sud Aviation continue de développer ses turbo réacteurs et met au point successivement depuis 1961 la Caravelle VIR puis le modèle VIN, avions qui présentaient également une cabine plus spacieuse, une meilleure maniabilité et une

¹² Facon, 2010, p.129-130

¹³ Mondey, 1977, p. 105 et 174

¹⁴ Musée Aeroscopia, 2014 [en ligne]

¹⁵ Facon, 2010, p.130

¹⁶ Facon, 2010, p.132

¹⁷ Facon, 2010, p.132-133

capacité de charge bien plus élevée que la Caravelle 3¹⁸ (passant de 40 à 50 tonnes de masse maximale au décollage). Au début des années 70, une dizaine de Caravelles VIR et VIN avaient été acquises par des sociétés sud-américaines et neuf autres desservaient les lignes d'Indian Airlines. Les nouveaux modèles de la gamme continuent à s'enchaîner, la Caravelle 10A Horizon puis la 10B (ou « Super Caravelle »), dotée cette fois-ci de réacteurs Pratt & Whitney, font leur apparition. La compagnie finlandaise Finnair en commande 8, puis vient le modèle 10R qui trouva en la compagnie danoise Sterling Airways son principal acquéreur. Enfin, arrivèrent les deux dernières versions de la Caravelle, la Caravelle 11R (1967) et la fameuse Caravelle 12. Cette dernière présentait le plus long fuselage et une structure renforcée pouvait accueillir près de 139 passagers. Outre une plus grande capacité d'accueil de passagers, la Caravelle 12 présentait un meilleur prix de revient au siège/km, ceci grâce notamment à ses réacteurs dont la consommation était inférieure de 15% des versions précédentes (pour une puissance supérieure !) ¹⁹. 12 exemplaires furent construits et le premier s'envola pour la première fois le 29 octobre 1970 (entrée en service officielle en 1972). Sept étaient destinées à Sterling Airways et les 5 autres à AirInter²⁰.

Un des derniers projets pour la Caravelle était le développement d'avion utilisant l'apesanteur pour économiser du carburant, expérience menée en 1987 par le CNES et qui déboucha sur la création du Zéro-G²¹. La fin des années 90 signe le retrait progressif des Caravelle de l'aviation civile, notamment en France, au profit du Boeing 737. Leur production prend fin et les différents modèles sont revendus à différents groupes essentiellement pour des vols charter et cargos (Waltair, compagnie de République Démocratique du Congo les utilisa jusqu'en 2005) ou sont acquis par des ferrailleurs. Air Provence qui avait racheté deux Caravelles 12 d'Air Inter, cessa de les utiliser en 1995, et devient ainsi le dernier opérateur civil en Europe. Au final, 280 Caravelles (prototypes et avions de séries confondus) ont été conçues, équipant plus de 30 compagnies à travers le monde durant les années 60²², ce qui leur permit de marquer leur empreinte dans l'aviation d'après-guerre.

¹⁸ La succession des différents modèles Caravelle est à mettre en compte directement avec l'évolution des réacteurs utilisés et la capacité de l'appareil à accueillir des passagers.

¹⁹ Aérospatiale, 1980, p.2 et 3 *non publié*

²⁰ Facon, 2010, p.133

²¹ Facon, 2010, p.133


²² J.H.Taylor et W.R. Taylor, 1978, p. 16

Tableau 1 Chronologie des différents types de Caravelle

Tableau chronologique des différents types de Caravelle de série ²³							
Type	1 ^{er} vol	Longueur	Passagers	Masse maximum	Réacteur	Nombre	Images
I	18.05.1958	32.01 m	80	43.5 t	RA-29 Mk. 522 et 526	20	
IA	11.02.1960	32.01 m	80	43.5 t	RA-29 Mk. 522A et 526A	6	
III	30.12.1959	32.01 m	99	48 t	RA-29 Mk.527 et 527B	85	
VI-N	10.09.1960	32.01 m	99	50 t	RA-29 Mk.531 et 531B	52	

²³ Aerospatiale, 1980

VI-R	06.02.1961	32.01 m	99	51 t	RA-29 Mk.532R et 533R	56	 ©Flickrriver
10A	31.08.1962	33.01 m	104	52 t	GE CJ805- 23C	1	 ©Flickrriver
10B3	03.03.1964	33.01 m	118	57 t	P&W JT8D-7	22	 ©Flickrriver
10R	18.01.1965	32.01 m	99	54 t	P&W JT8D-7	20	 ©Flickrriver
11R	21.04.1967	32.71 m	99	54 t	P&W JT8D-7	6	 ©Flickrriver

12	29.10.1970	36.23 m	139	58 t	P&W JT8D-9	12	
----	------------	---------	-----	------	---------------	----	---

Annexe 3 : Récapitulatif des caractéristiques techniques de la Caravelle 12

Tableau 2 Caractéristiques techniques de la Caravelle 12

SNCASE SE.210 Caravelle 12 ²⁴	
<p>Dimensions</p> <p>Longueur totale : 36.23 m</p> <p>Hauteur totale : 8.72 m</p> <p>Envergure : 34.30 m</p> <p>Diamètre du fuselage : 3.20 m</p> <p>Surface voilure : 146,7 m²</p> <p>Soutes : 16.5 m²</p> <p>Volume de carburant : 19'000 litres</p>	
<p>Masse</p> <p>Maximum au décollage : 58'000 kg</p> <p>Maximum à l'atterrissage : 49'500 kg</p> <p>A vide : 31'800 kg</p> <p>Charge marchande maximale : 13'200 kg</p>	
<p>Turboréacteurs</p> <p>2 X Pratt and Whitney JT8D-9 (USA) de 6577 kgp</p>	

²⁴ Tableau réalisé sur la base de Sud-Aviation, 1970, p. 4-30 et Aeroengineer, 2008 [en ligne]

Performances

Vitesse de croisière maximale : 825 km/h

Distance de décollage : 2460 m

Distance d'atterrissage : 1520

Distance franchissable : 2500 km/13200 kg

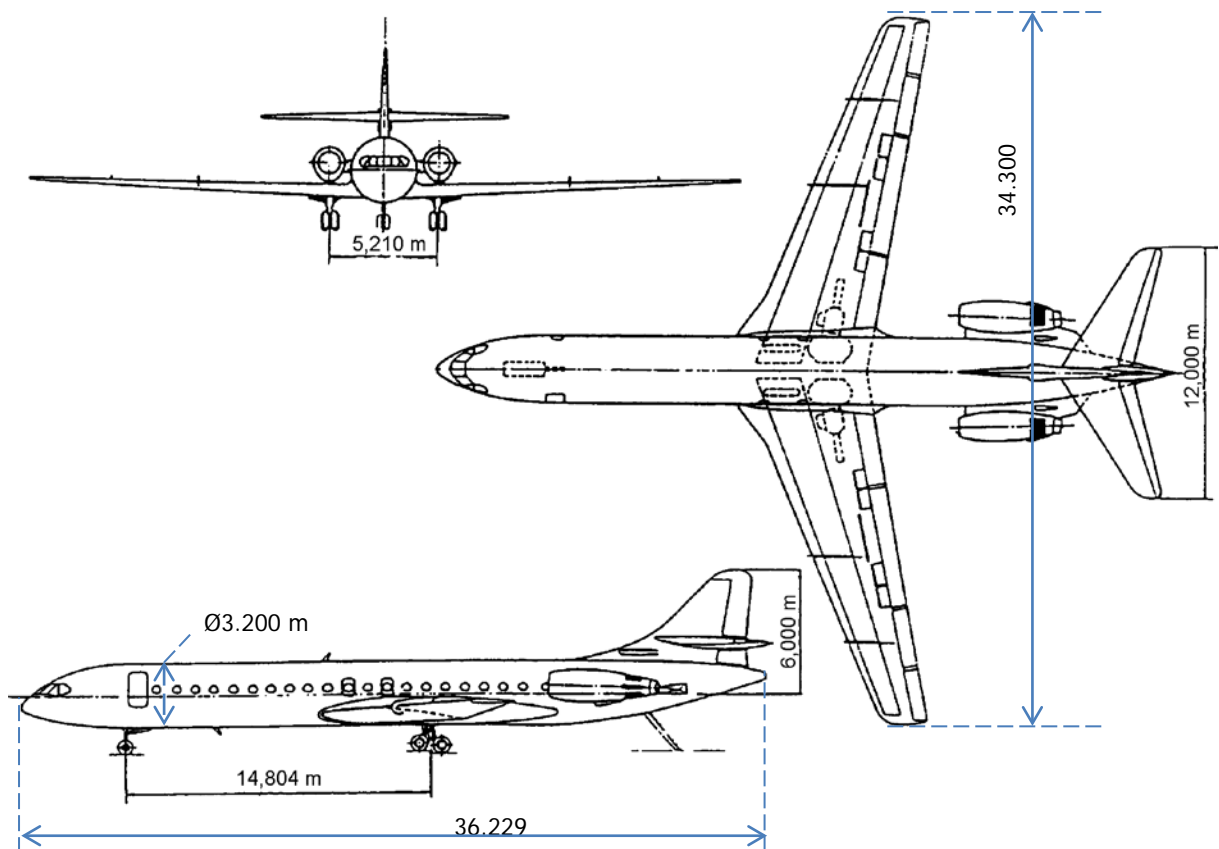
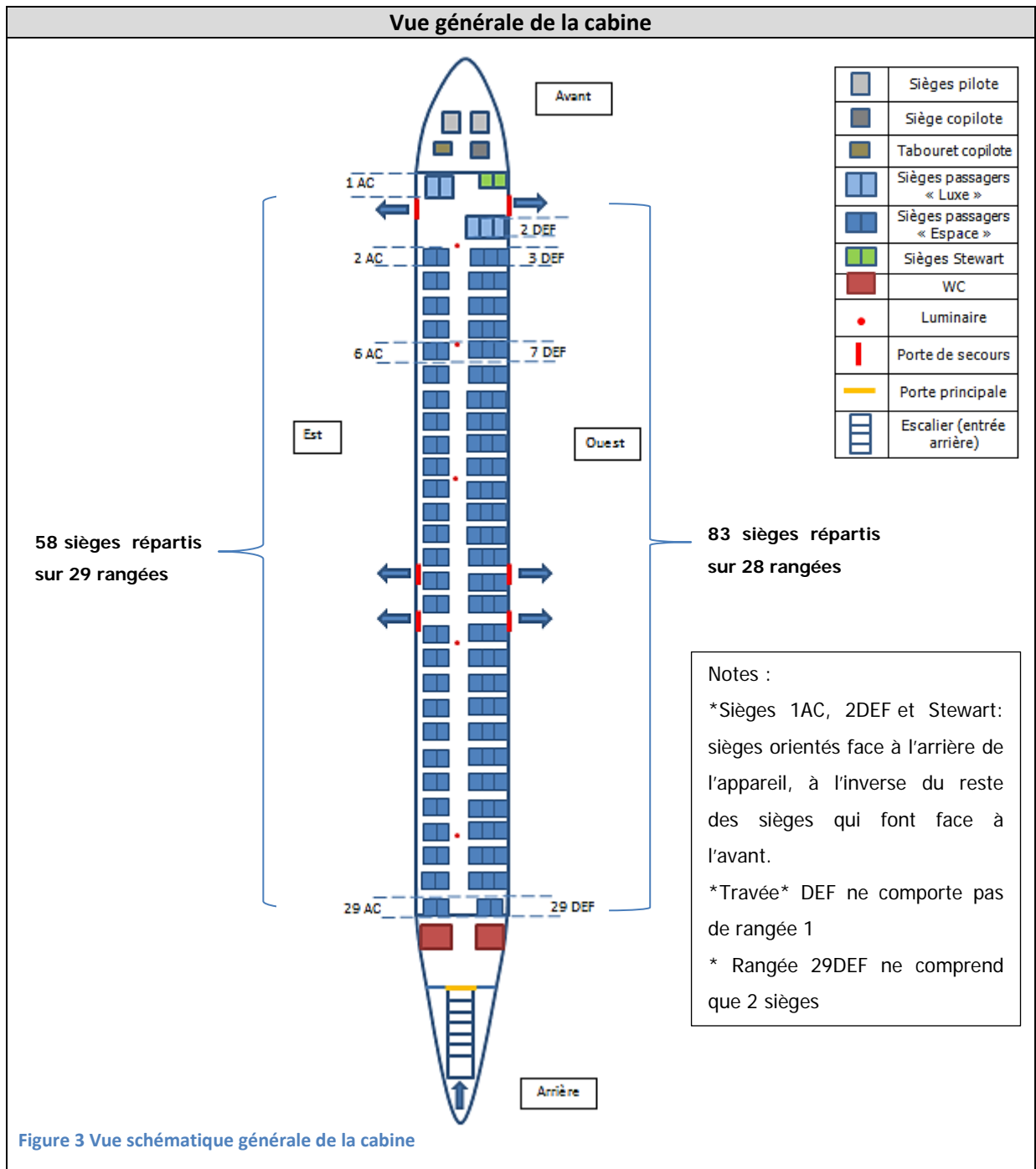
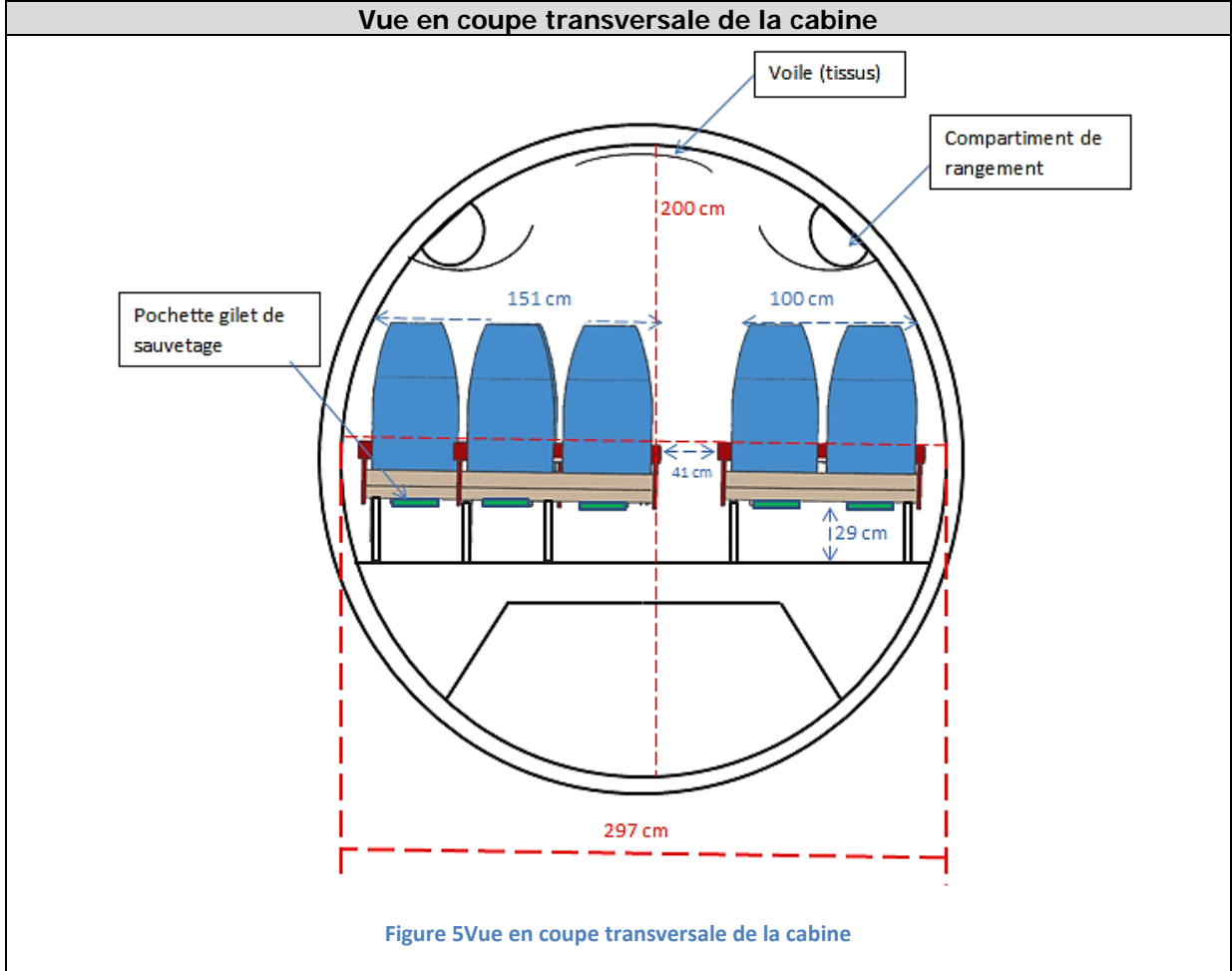
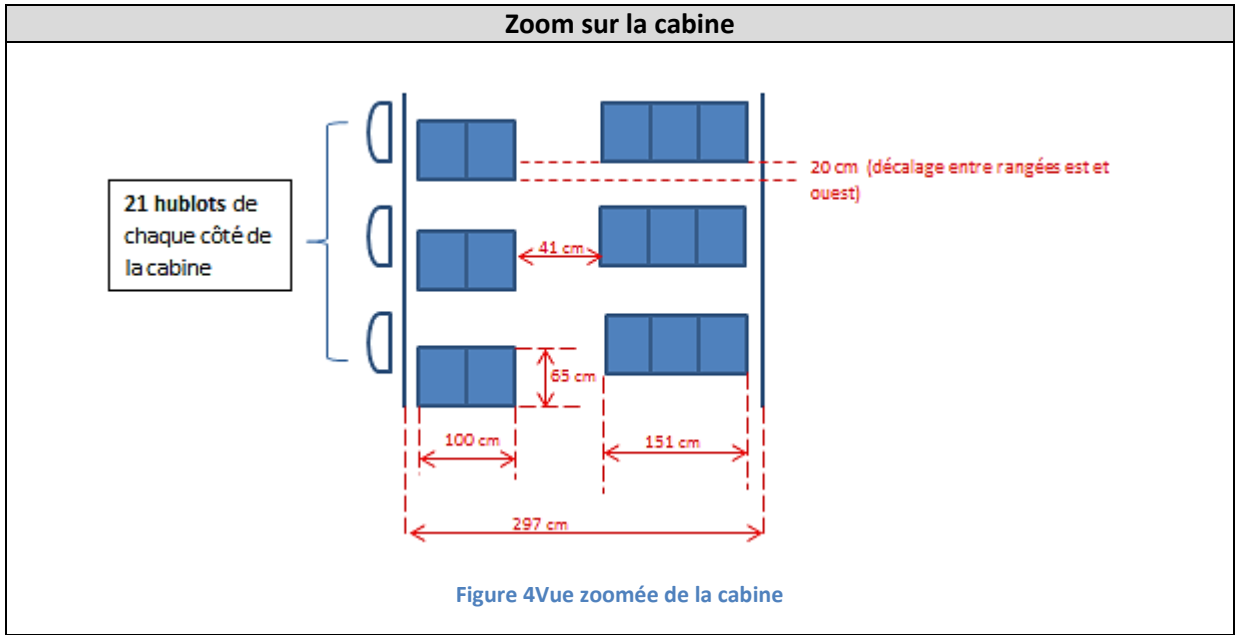


Figure 2 Dimensions de la Caravelle 12

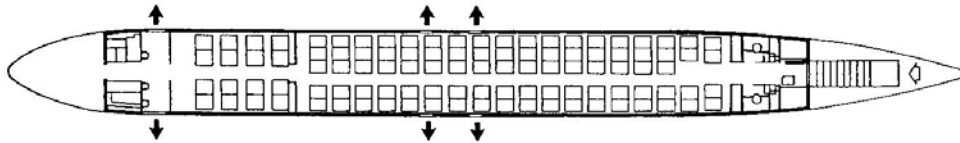
Annexe 4 : Schémas de la cabine de la Caravelle 12 du Bourget



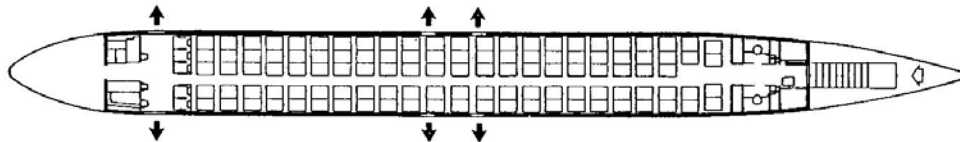


Les autres aménagements possibles de la Caravelle 12²⁵

1. Aménagement « Mixte » : 104 passagers, soit 16 passagers 1^{ère} classe (espacement de 38 pouces) et 88 passagers touristes (espacements de 34 pouces)



2. Aménagements « Touriste A » : 118 passagers (espacement de 34 pouces)



3. Aménagements « Touriste B » : 128 passagers (espacement de 32 pouces)

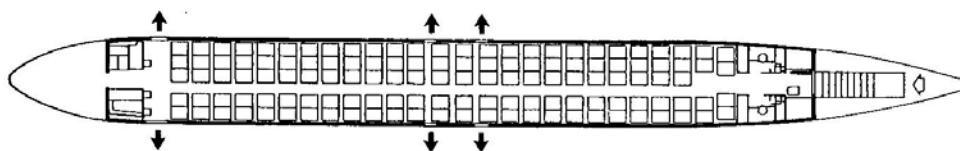


Figure 6 Autres aménagements de la Caravelle 12

Schéma de numérotation des sièges

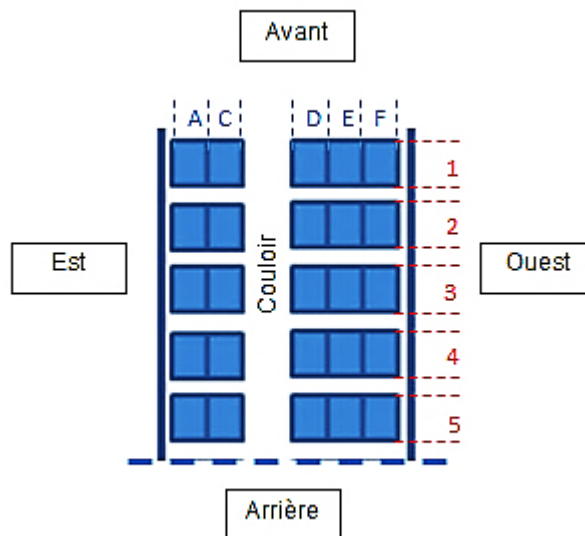
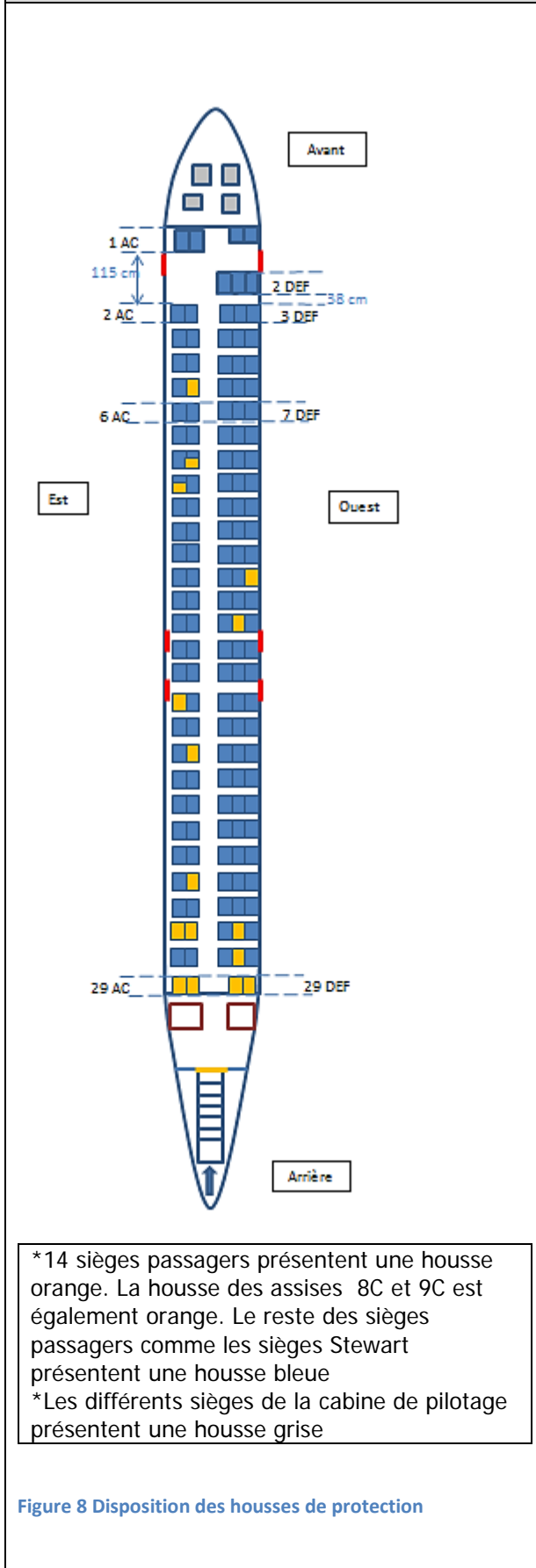


Figure 7 Les travées sont indiquées par une lettre (A et C pour celles côté Est et DEF pour celles côté ouest) et les rangées par un chiffre (1 à 29). Ainsi pour désigner un siège on citera la lettre correspondant à sa travée suivie du numéro de rangée correspondant. A noter que la travée B n'existe pas.

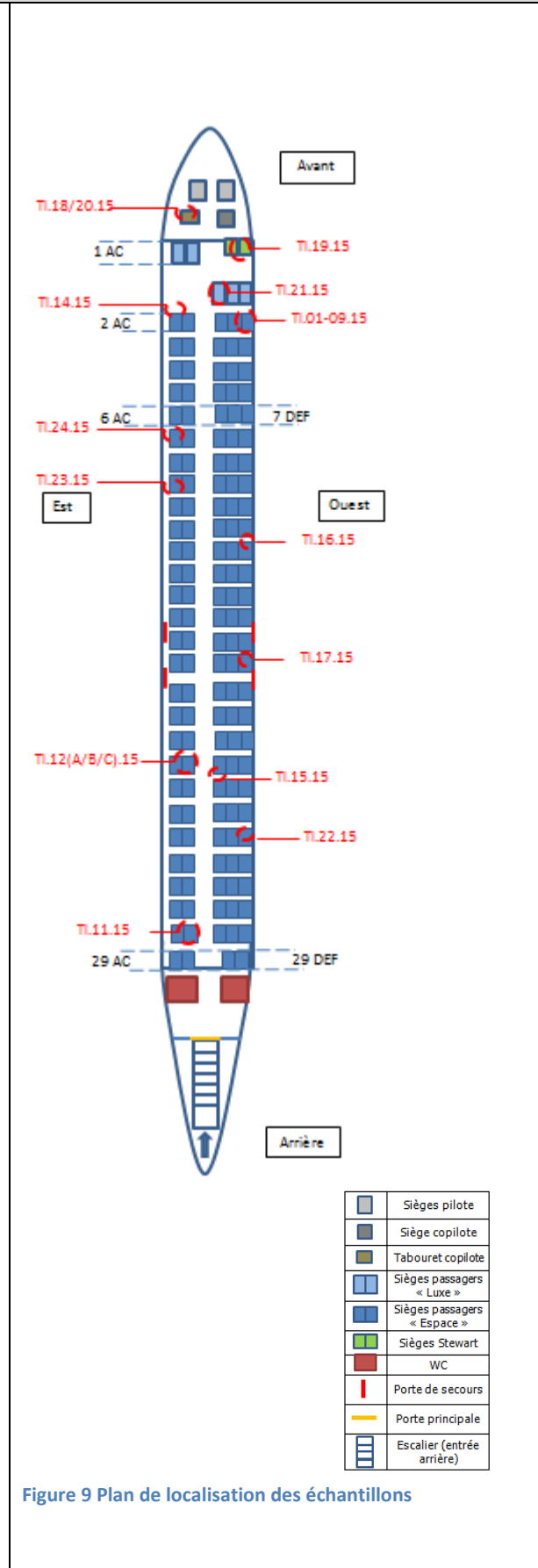
²⁵ Sud Aviation, 1969, p.10

Disposition des housses de protection et plan de localisation des échantillons



*14 sièges passagers présentent une housse orange. La housse des assises 8C et 9C est également orange. Le reste des sièges passagers comme les sièges Stewart présentent une housse bleue
 *Les différents sièges de la cabine de pilotage présentent une housse grise

Figure 8 Disposition des housses de protection



	Sièges pilote
	Siège copilote
	Tabouret copilote
	Sièges passagers « Luxe »
	Sièges passagers « Espace »
	Sièges Stewart
	WC
	Porte de secours
	Porte principale
	Escalier (entrée arrière)

Figure 9 Plan de localisation des échantillons

Annexe 5 : Photographies des altérations de la cabine

Photographies des altérations de la cabine de l'avion



Figure 10 Soulèvement de la moquette



Figure 11 Élément métallique au sol



Figure 12 Différents dépôts exogènes



Figure 13 Pelote de réjection d'oiseau et cadavre d'insecte

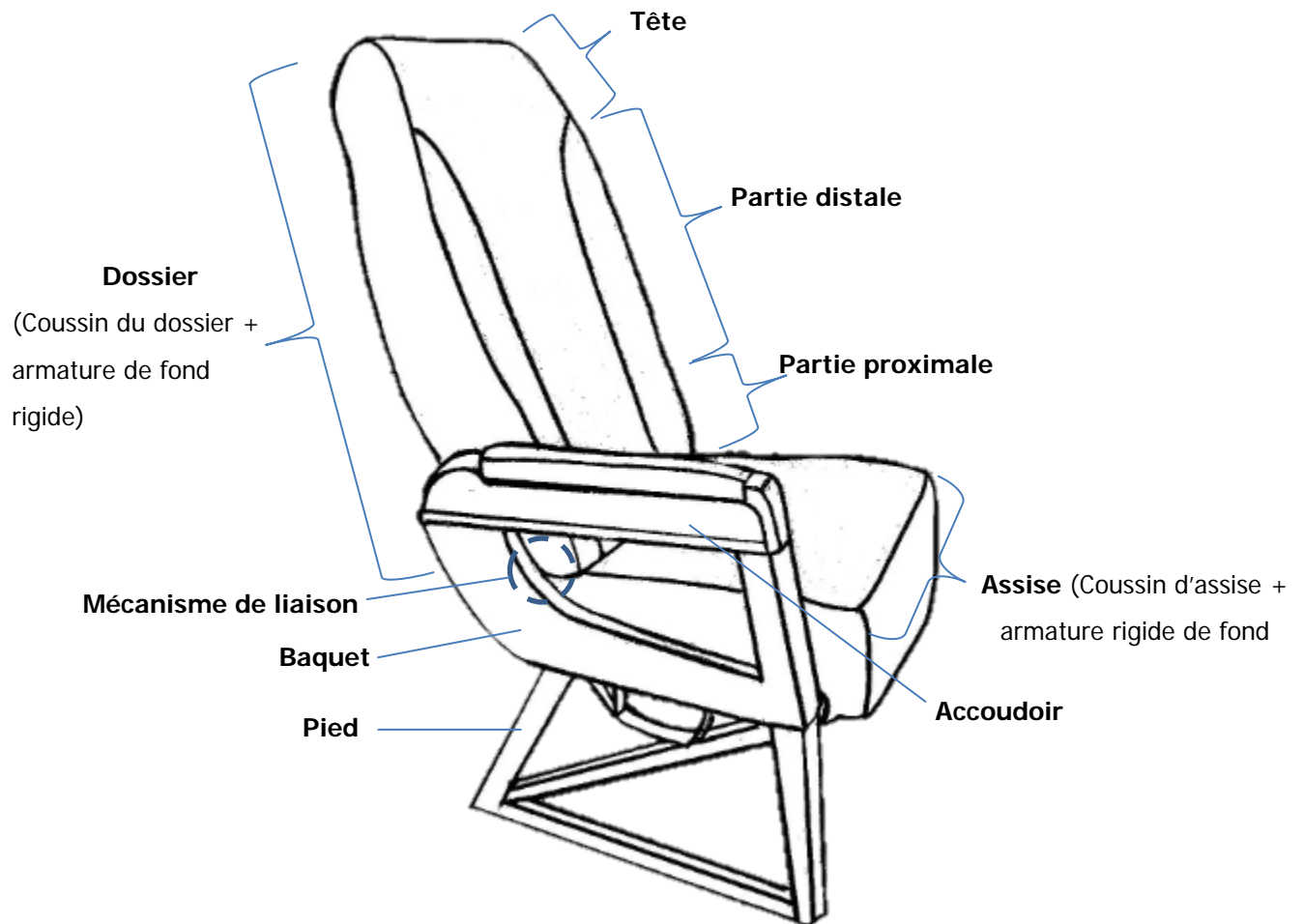


Figure 14 Dégradation des installations techniques



Figure 15 Compartiments de conservation des aliments lacunaire

Annexe 6 : schéma des parties constitutives d'un siège d'avion



* L'armature de fond rigide du dossier et de l'assise (reliés par le mécanisme de liaison) et les pieds forment l'ossature du siège.

Figure 16 Parties constitutives d'un siège d'avion

Annexe 7 : Description des sièges (co)pilotes et Stewart

Sièges Pilotes

Figure 17 Siège pilotes avec schémas de ses dimensions (cm)

Sièges disposés à l'avant de la cabine de pilotage, constitués d'une ossature métallique, avec accoudoirs, sur laquelle repose un coussin d'assise et de dossier. Ces derniers sont plus spacieux que les autres types de sièges et présentent un rembourrage plus épais.

Coussin d'assise : section de mousse de forme quadrangulaire. Comme dans le cas des autres sièges, le coussin d'assise est indépendant de celui du dossier et repose sur une armature rigide (connectée par un axe à celle de l'assise). A l'instar des coussins des sièges passagers, le rembourrage est recouvert par un système de double housse, boutonné à l'ossature du siège.

Coussin de dossier : section de mousse de forme quadrangulaire, se terminant en ogive. Le principe d'assemblage du coussin du dossier est similaire à celui du coussin d'assise, soit un système de double housse boutonnée à la structure métallique de base.

Ossature métallique porteuse : en aluminium, de couleur grise. L'armature de fond de l'assise et du dossier est connectée par un axe permettant de rétracter le siège. L'ossature de ce type de siège est plus complexe que pour les sièges passagers et permet, entre autre, d'avantage de réglages et d'ajustement de la hauteur et de la profondeur d'assise (ceci par l'intermédiaire de poignées présentes des deux côtés du siège, dissimulées en partie par des baquets).

Accoudoirs : les deux accoudoirs sont rétractables. Ces derniers sont recouverts d'une housse en cuir gris, avec ouverture par fermeture éclair

Ceintures : en plus de la ceinture abdominale, les sièges pilotes comportent également une double ceinture pectorale, rattachée au sommet du dossier.

Siège co-pilote

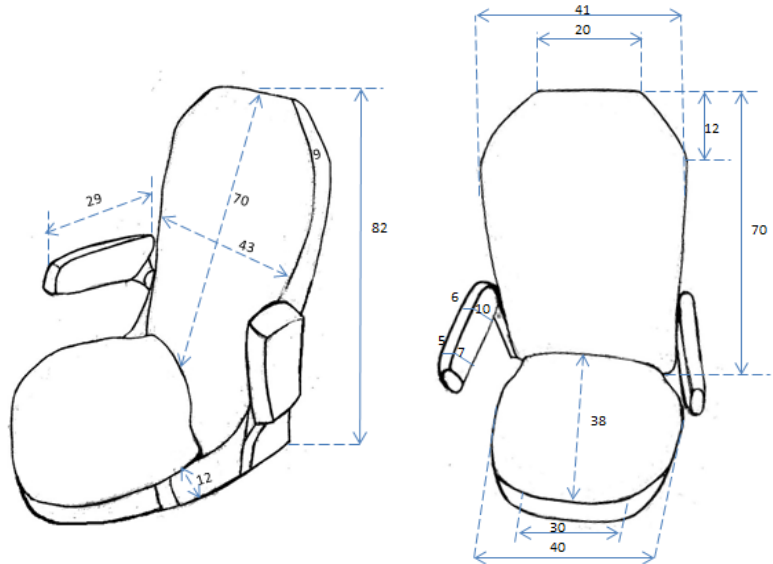


Figure 18 Siège co-pilote et schémas de ses dimensions

Siège disposé à l'arrière de celui du pilote droit. Sa composition est très proche de celle de ce dernier. Seules particularités son assise, de forme arrondie et plus étroite, sa tête de dossier aux angles trapézoïdaux et son ossature métallique qui repose non sur deux pieds mais sur une tige métallique centrale, lui permettant de pivoter à 180°.

Constat d'état général des sièges pilotes et co-pilote :

Housse : quelques tâches et zones de décoloration de la housse sont visibles. A noter, une importante déchirure de la 1^{ère} housse de protection de l'assise du siège co-pilote. De nombreux poils d'animaux sont présents en surface de même qu'une odeur d'urine s'émane des sièges.

Accoudoirs : extrémités de la housse en cuir particulièrement abrasée, avec déchirures partielles des coutures (mousse de rembourrage directement visible). Les housses ne sont plus ajustées correctement. L'accoudoir droit du siège du pilote gauche est manquant. Le rembourrage des accoudoirs des pilotes est particulièrement dégradé (pulvérulent et déformé).

Autres : les attaches des ceintures présentent des zones de corrosion et les sections de tissus sont effilochées. Les poignées de réglages de l'inclinaison du dossier et de la profondeur d'assise sont grippées.

De manière générale, les sièges pilotes présentent un meilleur état de conservation que le reste des sièges (notamment au niveau du rembourrage).



Figure 19 Le revêtement en cuir des accoudoirs et la housse de protection sont dégradés

Tabouret co-pilote

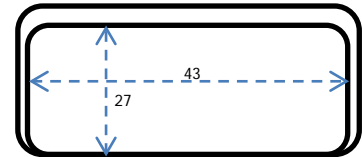
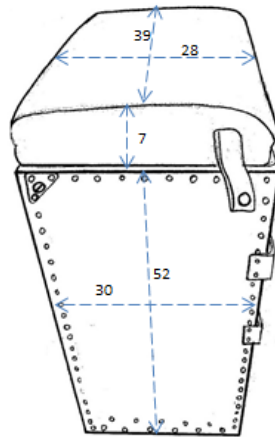


Figure 20 Tabouret co-pilote et schémas des dimensions de l'assise (à gauche) et du dossier (à droite)

Le tabouret de co-pilote se tient à l'arrière du siège pilote gauche. Il se compose d'un coussin d'assise s'insérant sur une plateforme métallique quadrangulaire. Le dossier est indépendant de l'assise et est maintenu contre la cloison du cockpit par un velcro.

Coussin d'assise : section de mousse quadrangulaire contenue dans une simple housse en tissu de couleur grise, à ouverture à velcro.

Coussin de dossier : section de mousse quadrangulaire (plus fine que celle constituant l'assise) contenu dans une housse de cuir gris clair (légèrement brillante).

Ossature métallique porteuse : structure de forme quadrangulaire formant un bac en son sommet (permettant l'accueil du coussin), fabriquée en aluminium et teintée en gris. Sa jonction avec le coussin d'assise se fait par l'intermédiaire de boutons. A noter également la présence d'une ceinture abdominale.

Constat d'état spécifique au tabouret co-pilote :

Coussin d'assise : la housse comprend de nombreuses tâches brunes et une déchirure (4 cm) sur un de ses côtés. Le velcro du dossier se décolle.

Coussin du dossier : la housse de protection présente également une déchirure (4.5 cm) sur son côté droit, laissant apparaître la mousse de rembourrage.

Ossature métallique : pertes du revêtement gris (sur les arrêtes). Des marques de corrosion sont également visibles sur le pourtour de sa partie supérieure.

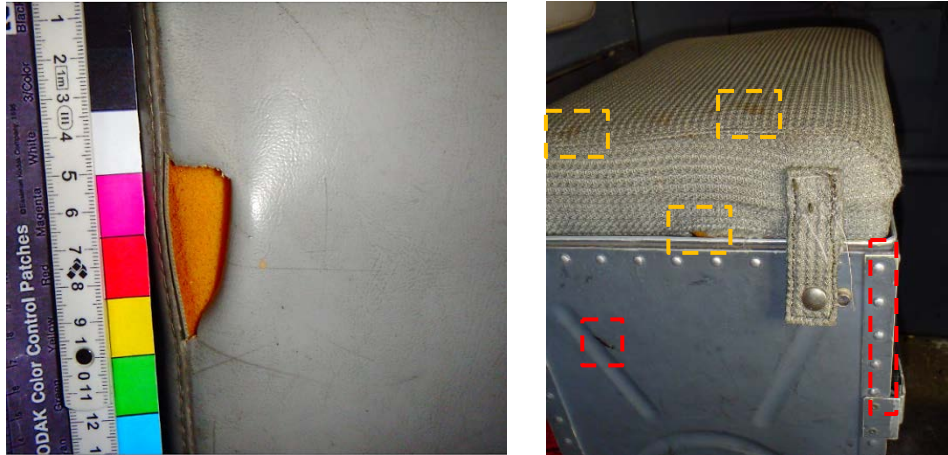


Figure 21 Housse du dossier déchirée et assise présentant des taches et des marques de corrosion

Sièges Stewart

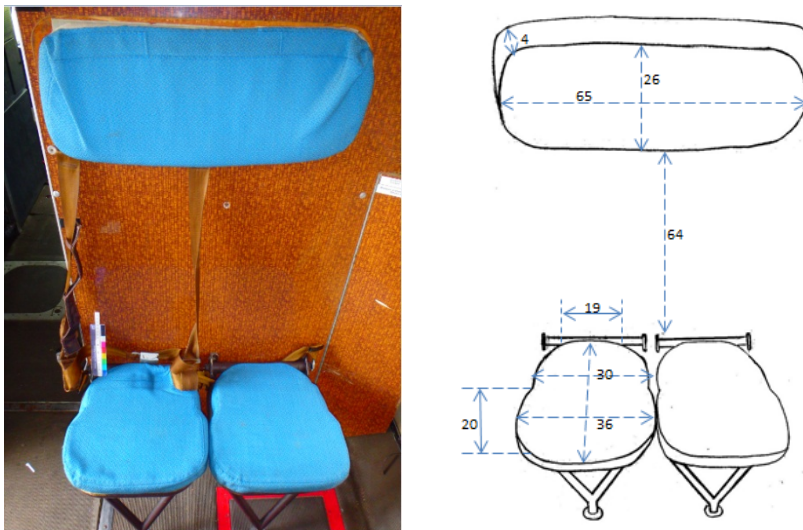


Figure 22 Sièges Stewart et schéma de ses dimensions

Les sièges Stewart se composent d'un coussin d'assise reposant sur une armature de fond métallique, entièrement rétractable contre le mur. Les deux sièges partagent un dossier commun plaqué par des velcros contre la cloison séparant le cockpit de la cabine passagers.

Coussin d'assise : section de mousse souple en forme de cloche, contenu dans une housse de tissus bleue. Cette dernière est rattachée à l'armature métallique par un velcro.

Coussin du dossier : section de mousse (d'épaisseur plus fine que le coussin d'assise) contenu dans une housse de même couleur que celle du coussin d'assise. Comme ce dernier, le coussin du dossier est maintenu à la paroi par un velcro.

Les deux coussins présentent, à l'arrière, une ouverture centrale par velcro.

Ossature métallique : partie supportant le coussin d'assise, constituée d'une plaque en polymère de synthèse rigide (découpée selon la forme du coussin) maintenue sur un cadre de tiges métalliques en aluminium avec un pied central rétractable. L'ensemble de l'ossature est peinte en brun.

A noter également la présence de ceintures individuelles (composition similaire à celle des sièges passagers).

Constat d'état spécifique aux sièges Stewart :

Ossature métallique : perte du revêtement brun avec des zones de corrosion (notamment à l'avant, car il s'agit de l'endroit que l'on saisit pour descendre les sièges !). Le système rétractable des assises est quelque peu grippé.

Housses : tâches brunâtres, notamment visibles sur la housse du dossier.

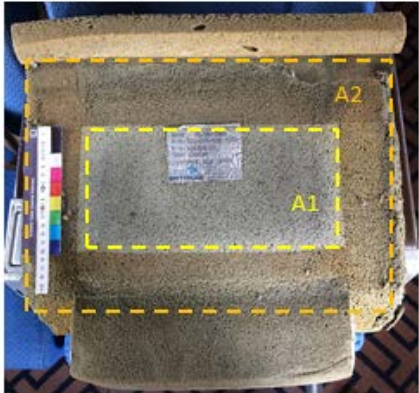
Coussin dossier/assise : Perte partielle d'adhérence velcro. Une déformation du coussin du dossier est particulièrement visible (affaissement)



Figure 23 Ossature de l'assise corrodée et perte d'adhérence du velcro

Tableau 3 Caractérisation des mousses

Annexe 8 : Caractérisation des mousses en présence

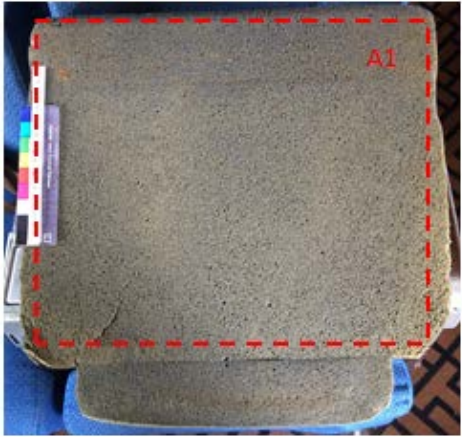

Caractérisation des mousses en présence		
Type de mousse	Etats de surface	Emplacements spécifiques
<p>A</p> <p>Mousse de couleur gris/marron +/- foncée, avec des reflets verdâtres et plutôt douce au toucher. Elle est très peu collante/pulvérulente et reprend sa forme après pression.</p> <p>Épaisseur : environ 9 cm</p> 	<p>A1</p> <p>C. ²⁶: gris avec nuances de brun</p> <p>To.²⁷ : partie la plus douce de l'assise, non-collante.</p> <p>T.R²⁸ : reprend facilement sa forme après pression</p> <p>T.S²⁹ : peu de résidus</p> <p>Portion de l'assise présentant le meilleur état de conservation</p>	<p>Sièges passagers (mod.1/2/3) – coussin d'assise – partie centrale du dessous</p>
	<p>A2</p> <p>C.: plus foncé qu'A1 (marron)</p> <p>To.: moins doux qu'A1 et légèrement collant.</p> <p>T.R : reprend sa forme après pression (mais un peu moins bien que A1/moins souple).</p> <p>T.S : similaire à A1</p>	<p>Siège passagers (mod.1/2/3) - coussin d'assise – bordure du dessous</p>



²⁶ C. = Couleur

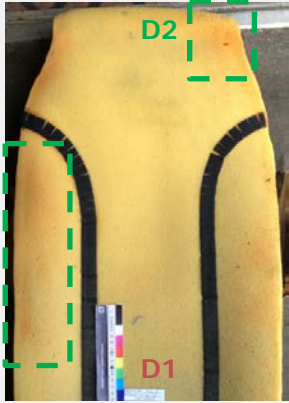

²⁷ To. = Toucher. Consulter le détail de la mise en œuvre des différents tests au *tableau 19, p.85.*

²⁸ T.R = Test de Résilience

²⁹ T.S. = Test Scotch

	<p>A3</p> <p>C. : Marron-noir, plus foncé que N°2 To. : plus rigide qu'A1 et A2, légèrement poisseux (comme B) T.R. : reprend sa forme après pression, mais plus difficilement qu'A2 T.S. : plus de résidus que A1 mais moins que B.</p> <p>Cette partie de la mousse comporte des dépôts brillants en surface (légèrement collants), quelques lacunes et des résidus de fils bleus de la housse.</p>	<p>Sièges passagers (mod.1) – coussin d'assise – surface de dessus</p>
<p>B</p> <p>C. : Gris/noir foncé To. : surface très dure et cassante, légèrement poisseuse. T.R. : provoque perçage ou du moins marquage irréversible (grésillement/craquèlement perceptibles auditivement) T.S : nombre important de résidus.</p> <p>Partie du coussin d'assise la plus dégradée. Elle est particulièrement pulvérulente (sa surface part en lambeau à chaque manipulation, accompagnée d'un nuage de poussières)</p> <p>Epaisseur : 1.5 cm</p>		<p>Sièges passagers (mod.1/2/3) – flancs des coussins du dossier</p> <p>Sièges passagers (mod.2/3) Flancs des coussins d'assise</p>

C	<p>Mousse brune +/- foncée. Dure (dureté comprise entre A et B), cassante et pulvérulente (mais moins que B). Apparition de marques irréversibles sous pression Epaisseur : 8 cm</p>	C1	<p>C. : brun, plus clair que C2 To. : rigide, mais moins que C2, légèrement poisseux/collant T.R. : reprend très difficilement sa forme, laissant une marque en surface (plus souple que C2). (grésillement/craquèlement perceptibles) T.S. : plus de résidus qu'A3 mais moins que B</p> <p>Structure macroscopique en nid d'abeille, comprenant que quelques fissures. Malgré une surface homogène, la partie centrale présente un meilleur état de conservation que la bordure.</p>	<p>Siège passagers (mod. 1/2/3) – Arrière du Coussin du dossier</p> 
		C2	<p>C. : brun foncé To. : très rigide (rigidité comprise entre b et C1) et cassante. Légèrement plus collant que C1. T.R. : se marque facilement voire même se perce. T.S. : nombre de résidus similaires à C1. Mousse particulièrement pulvérulente (mais moins que B).</p> <p>La partie supérieure (tête) de la mousse est plus dégradée (pulvérulente et cassante) que la partie intermédiaire et basse. L'état de conservation de cette mousse, bien que jouissant d'une meilleure cohésion, est proche du type B.</p>	<p>Siège passager (mod.2) – Dessus du coussin du dossier</p> 

D	<p>Mousse constitutive des sièges passagers la plus souple. De couleur jaune, elle reprend facilement sa forme après pression. Mousse constitutive du rembourrage des dossiers (mod.1 et 3) qui présentent le meilleur état de conservation.</p> <p>Epaisseur : 1.5 cm</p>	<p>D1</p> <p>C. : jaune To. : plutôt douce, souple et légèrement poisseuse. T.R. : reprend facilement sa forme après pression (légèrement moins bien qu'A1). T.S. : peu de résidus (similaire à A1/A2)</p>	<p>Siège passager</p> <p>- Mod. 2/3 – Dessus du coussin d'assise – pourtour</p> <p>- Mod. 1/3 – coussin du dossier – partie centrale supérieure (haut du dos)</p>
	 <p>Detailed description: A photograph of a yellow passenger seat. A red dashed box labeled 'D1' is on the lower part of the seat, and a green dashed box labeled 'D2' is on the upper part. A color calibration strip is visible at the bottom left of the seat.</p>	<p>D2</p> <p>C. : jaune/orange (avec zones oranges foncé/rouge plus marquées) To. : plus rigide que D1 (mais moins que type C), pulvérulence similaire à C1. T.R. : reprend sa forme, mas plus difficilement que D1). T.S. : similaire à type C</p>	<p>- Mod. 2/3 – dessus du coussin d'assise – partie centrale et avant</p> <p>- Mod. 1/3 – coussin du dossier – partie supérieure (côtés et centre)</p>
E	<p>C. : Mousse jaune, légèrement plus foncée/orangée que D. Elle présente une surface homogène (ne présente pas différents états de surface). To. : similaire à D1 T.R. : reprend facilement sa forme après pression (similaire à A1) T.S : similaire à D1</p> <p>Epaisseur : 7.5 cm</p>		<p>- Sièges pilotes et copilote – coussin d'assise et du dossier et tabouret – coussin d'assise</p>  <p>Detailed description: A close-up photograph of a yellow foam sample labeled 'E'. Below the foam is a color calibration strip with a ruler showing centimeters from 1 to 15.</p>

<p>F</p>	<p>C. : Mousse jaune, plus claire que D1. Surface homogène (un seul état de surface observé) To. : plus douce et souple que D1 et A1. Elle n'est pas collante ni pulvérulente. T.R. : reprend très facilement sa forme T.S. : quasiment pas de résidus</p> <p>La mousse F présente le meilleur état de conservation des mousses constitutives des sièges en général. Elle paraît plus récente que le reste des mousses et ne présente pas d'altérations/fragilités particulières.</p> <p>Epaisseur : 3.5 cm</p>	<p>- Tabouret (co-pilote) – coussin du dossier - Accoudoirs sièges pilotes</p> 
<p>G</p>	<p>C. : brun-noir foncé. Couleur homogénéisée sur toute la surface To. : rigide, cassante et pulvérulente (état compris entre B et C2) T.R : peine à reprendre sa forme sous pression avec l'apparition d'une marque irréversible (voire même se perce). Grésillement/craquèlement perceptibles. T.S. : similaire à C2</p> <p>Cette mousse est très similaire à au type B, à la seule différence qu'elle présente une meilleure cohésion d'ensemble (se délite moins facilement)</p> <p>Epaisseur : 3-4.5 cm</p>	<p>Sièges Stewart – coussins d'assise et du dossier</p> 
<p>H</p>	<p>C. : jaune/vert To. : similaire à A3 (légèrement cassante). T.R : similaire à A3 T.S. : similaire à C3</p> <p>Epaisseur : 1cm</p>	<p>Sièges passagers – accoudoirs</p> 

C. : pourpre

To. : matériaux très rigide et compact

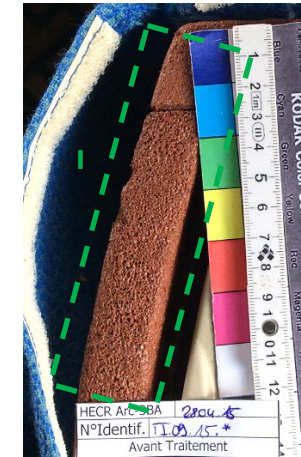
T.R : matériau difficilement déformable, non résilient (si déformation il y a, elle est irréversible)

T.S : peu de résidus

Ce matériau est différenciable des autres mousses, par sa grande dureté et sa couleur. Elle n'est pas constitutive du rembourrage mais s'inscrit comme un des éléments structurels du siège. Pas d'altération particulière.

Epaisseur : 3.5 cm

Sièges passagers - dossier- bordure arrière



Commentaires relatifs au tableau de caractérisation des mousses

Les types de mousse B, E, F G et H présentent un aspect de surface homogène (pas d'état de surface différenciables). Bien que la problématique du rembourrage des accoudoirs ne soit pas abordée dans ce travail (au niveau de la technique de retrait), les mousses constitutives de ces parties ont été caractérisées dans une démarche similaire au rembourrage des coussins d'assise et du dossier. Ceci en vue de donner les premières bases d'une investigation plus poussée sur le sujet. Il en va de même pour la mousse rigide (type I) constituant une bordure à l'arrière des sièges passagers, qui ne fait pas partie du rembourrage mais qui s'inscrit comme un matériau constitutif des sièges.

Par ailleurs, plusieurs diagnostics peuvent être avancés pour expliquer certains états de conservation des mousses de rembourrages³⁰. Le dessous des mousses des coussins d'assises des sièges passagers (type A1, des modèles 1) présentent un meilleur état de conservation que le dessus (type A3) puisque cette partie est davantage à l'abri de la lumière du jour et n'est pas en contact direct avec le corps du passager. Il en va de même pour la mousse des coussins de dossier (modèle 2) dont l'arrière (type C1) est en meilleur état que l'avant (type C2) puisque cette partie n'a pas été directement sollicitée par le corps du passager. Les parties davantage orangeâtes des mousses jaunes de type D, correspondent aux zones de contacts directs avec les phénomènes de sudation des passagers. Par ailleurs, la tête du rembourrage des dossiers (qui se recourbent vers l'arrière) est particulièrement dégradée (partie le plus souvent déchirée partiellement ou complètement et particulièrement pulvérulente), ceci est dû à la présence d'un joint en caoutchouc qui traverse l'intérieur de la recourbure. Ce dernier, en vieillissant, libère des composés soufrés qui accélèrent la dégradation des matériaux alentours³¹. L'état de dégradation très avancé des mousses de type B peut s'expliquer par son contact direct avec le côté de l'ossature métallique du siège. Enfin, les sièges pilotes présentent un meilleur état de conservation que les autres sièges. Ceci peut s'expliquer tout d'abord par une qualité d'assemblage supérieure permettant une meilleure préservation du rembourrage (ex : système de double housse recouvrant la mousse de rembourrage) et on peut supposer que, vu leur statut particulier, ils auraient bénéficié d'un entretien plus régulier que les autres sièges. Enfin, au vu des qualités mécaniques et visuels de la mousse de type F, il est vraisemblable que cette dernière a été installée plus récemment que les autres.

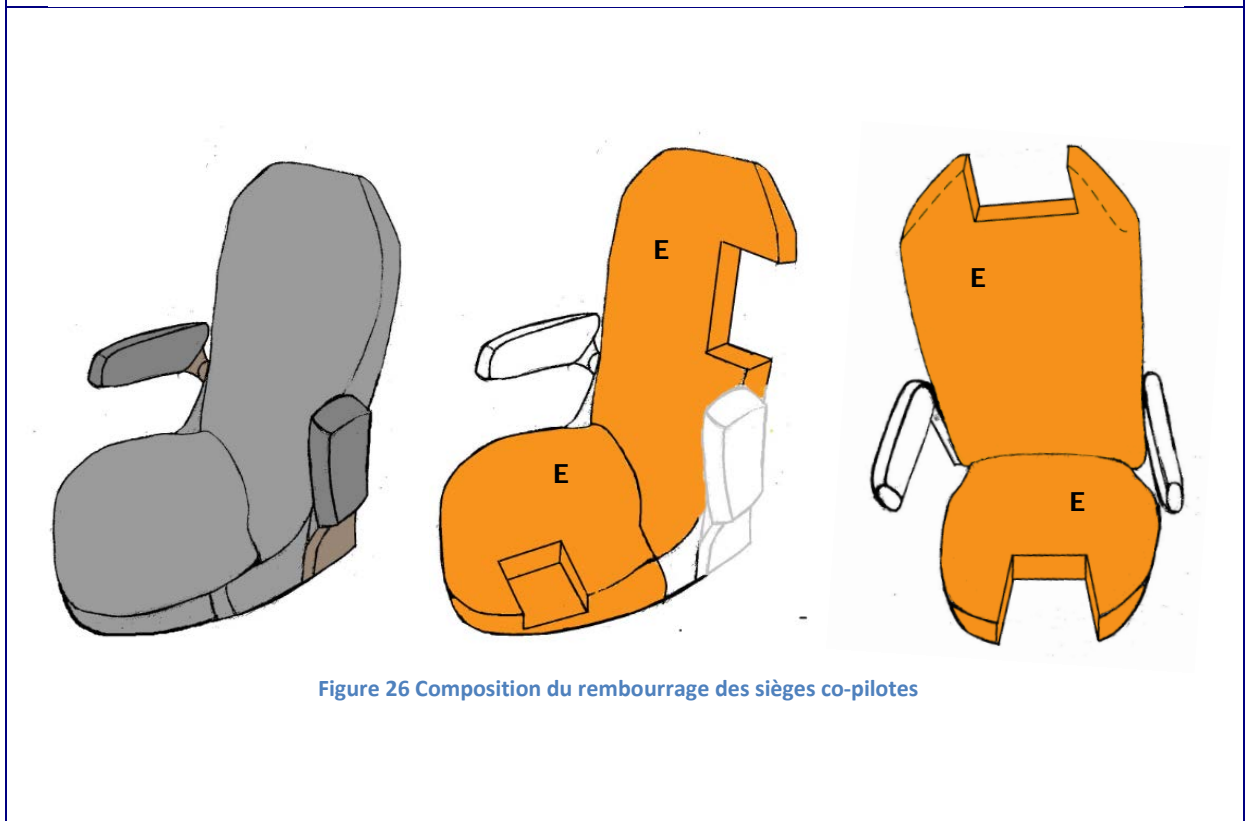
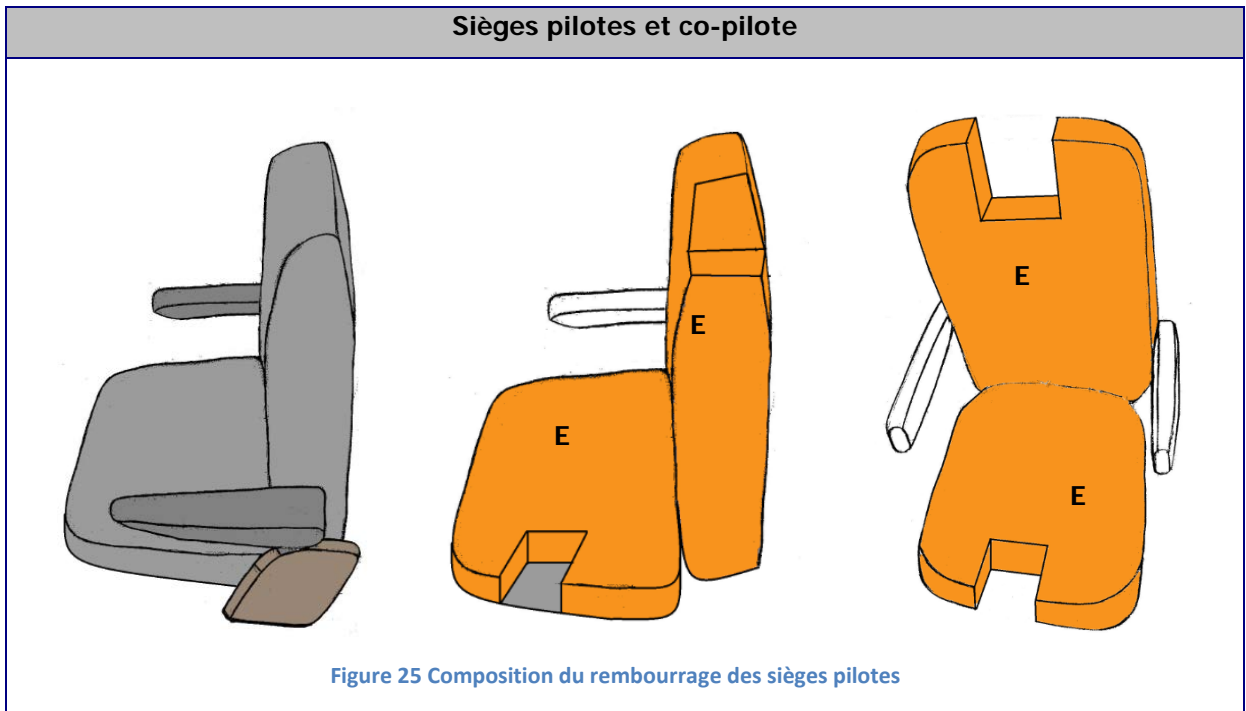


Figure 24 Le joint en caoutchouc peut être à l'origine de la dégradation avancée de la mousse

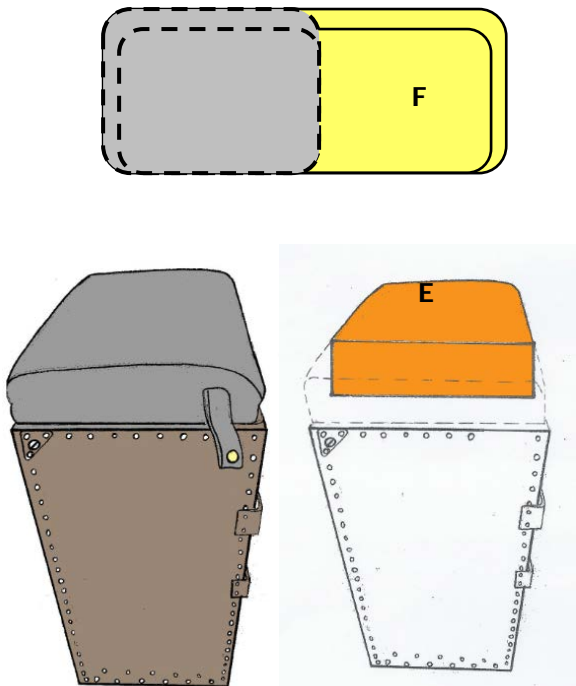
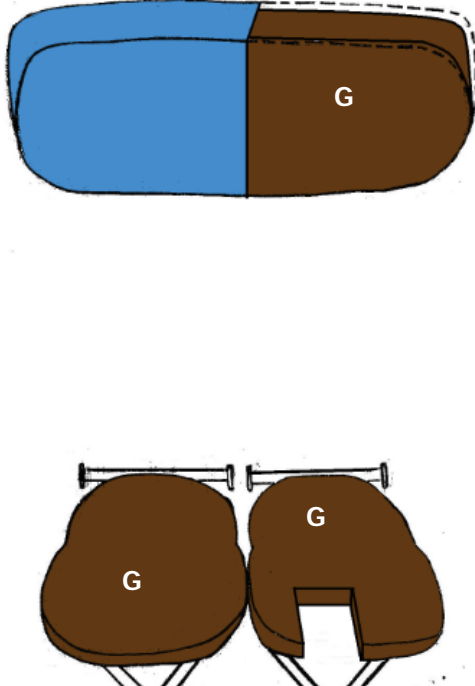
³⁰ L'état de conservation des mousses est à mettre en relation directe avec l'emplacement du siège, le type de mousse en présence et son degré de sollicitation durant la période d'utilisation.

³¹ ICC, 2014 [en ligne]

Annexe 9 : Description du rembourrage en mousse des sièges (co)pilotes et Stewart



Les sièges pilote et copilote présentent la même configuration de rembourrage. Une mousse de type E constitue l'assise et le dossier.

Tabouret co-pilote	Sièges Stewart
	
<p data-bbox="252 992 810 1048">Figure 27 Composition du rembourrage du tabouret co-pilote</p> <p data-bbox="225 1126 836 1205">Assise : un bloc de mousse simple de type E constitue le rembourrage de l'assise.</p> <p data-bbox="225 1267 836 1346">Dossier : constitué d'un seul bloc de mousse de type F.</p>	<p data-bbox="901 1050 1406 1106">Figure 28 Composition du rembourrage des sièges Stewart</p> <p data-bbox="863 1135 1445 1263">Le rembourrage des assises et du dossier sont constitués d'un même type de mousse, soit un bloc de type G.</p>

Annexe 10 : Protocole d'échantillonnage pour les tests d'identification et tableau récapitulatif des échantillons prélevés.

Protocole établi sur la base du document : CEN, 2012³²

L'étape d'échantillonnage et le protocole qui lui est associé dépend de nombreux facteurs à savoir : la nature du matériau à prélever, son état de conservation, l'objet patrimonial auquel il est associé mais aussi du type d'investigation envisagé. Il faut toujours garder à l'esprit le caractère invasif et dommageable d'une telle action, même lorsqu'il s'agit de micro-prélèvements. Il en va de la matérialité du bien et du respect de son intégrité. Pour ce faire, il faut prélever de façon à réduire au minimum toutes perturbations visuelles ou dégradations engendrées par l'action et opérer sur une partie discrète de l'objet, mais néanmoins accessible pour effectuer le prélèvement de manière

³² Le protocole ci-dessous a été réalisé sur la base des normes européennes en matière de méthodologie d'échantillonnage des matériaux. CEN, 2012, p.221-227

adaptée. Il est important de ne prélever que le nombre minimal d'échantillons et de quantité de matière nécessaire en fonction des exigences de l'étude pour laquelle ils sont destinés. Les prélèvements doivent également être représentatifs de l'objet/matériau et de son état de conservation sur lequel l'investigation se porte. Le protocole doit impérativement être réalisé en accord avec les responsables des collections et prendre en compte leurs attentes et dispositions et toute l'opération doit être retranscrite le plus clairement et précisément possible.

A. Critères d'échantillonnage

Avant toute chose, il est important de définir les objectifs de l'échantillonnage et de justifier l'opération mais également de considérer les prescriptions définies par le responsable de l'objet.

Dans le cas présent, il s'agit de procéder à la prise d'échantillons destinés à la réalisation de tests d'identification. Ces derniers sont essentiels dans le projet puisque la connaissance de la nature du matériau va conditionner les méthodes de conservations adaptées à la situation qui seront proposées au musée, puisque chaque polymère de synthèse présente ses spécificités. Reconnaître les constituants d'un objet ou d'un matériau est primordial pour comprendre et anticiper ses processus de dégradation et pour développer des mesures ou traitements adaptés pour sa conservation à long terme, son stockage ou encore sa mise en exposition³³. Concernant les prescriptions fournies par le conservateur, ce dernier souhaite que les prélèvements soient le moins visibles sur l'objet et qu'ils proviennent le plus possible de résidus trouvés sur ou à proximité des sièges.

B. Evaluation préliminaire

L'établissement d'un protocole ou plan d'échantillonnage commence par une étude préliminaire de l'objet, retranscrivant de manière claire et précise sa description, son état de conservation (constat d'état) ainsi que fournir toutes informations pertinentes liées à son contexte de conservation. Dans cette optique, j'ai commencé par caractériser les éléments extérieurs/environnement de l'objet pour terminer par la mousse. Ainsi, je me suis tout d'abord intéressé au type d'avion en présence, ses spécificités et son emplacement. Suite à cela, je me suis concentré sur l'intérieur de la cabine (agencement, nombre de sièges,...) avant de procéder uniquement à la caractérisation d'un siège. Pour cela j'ai tout d'abord procédé à une première observation à l'œil nu. Puis pour une inspection davantage précise des sièges et pour découvrir au mieux ses différentes spécificités (assemblages, matériaux, constat d'état...) j'en ai déshabillé deux exemplaires (retiré la housse) pour permettre une comparaison de leur assemblage et d'état de conservation de la mousse constitutive. Plus spécifiquement à la mousse, j'ai tenté d'identifier et de caractériser les divers types en présence et les différents états de surfaces qu'elles présentent.

³³ Gold, 2004, p.45

C. Protocole

Le plan d'échantillonnage repose sur les observations et remarques faites lors de l'évaluation préliminaire mais aussi établi en collaboration avec l'institution. Il doit également prévenir toutes interrogations entourant l'opération en argumentant chacun de ces choix (emplacement, nombre et taille). Le protocole ci-dessous présente le processus décisionnel ayant abouti à la prise d'échantillons, du choix du mode opératoire, des exigences de documentation et de manipulation que l'action implique et fait mention également des différentes étapes à mener en amont, essentiel pour construire le projet.

Choix de l'emplacement

Des prélèvements seront effectués sur des résidus de mousse placés à proximité des sièges. Par ailleurs, cette stratégie de prélèvements comporte aussi ses limites. Bien que les résidus de mousses puissent se situer à proximité des sièges, on ne peut être sûr que ces derniers proviennent bien de ceux-ci (et pas d'un autre constituant de la cabine) et encore moins de savoir à quel siège et bloc de mousses en particulier ils appartiennent. De plus, étant pour la plupart disposés sur le sol, il ne serait pas étonnant qu'ils aient pu être contaminés par d'autres substances exogènes présentes aux alentours (ndlr. Traces d'excréments, cadavres d'insectes et autres déchets ménagers retrouvés sur le sol de la cabine). C'est pourquoi je vais également procéder à des prélèvements à même la mousse de rembourrage encore en place. Ils seront ainsi effectués pour chaque type de mousse composant le rembourrage (aussi bien pour le dossier que pour l'assise du siège), mais aussi pour chacun des états de surface présenté par ces dernières, de manière à pouvoir les caractériser au mieux et de voir si l'état de conservation a une quelconque influence sur la composition chimique du matériau. Enfin, des microéchantillons de mousse seront prélevés sur d'autres sièges placés à différents endroits de la cabine, de manière à s'assurer, après une comparaison faite sur la base des tests d'identification, s'il comporte des mousses de rembourrage de même nature ou s'il existe des différences. Concernant le choix de l'emplacement à proprement parlé, pour les résidus prélevés à même le sol, j'ai veillé à ce que ceux-ci soient les plus proches des sièges et placés à proximité d'une zone visible de la mousse dégradée (pulvérulente), ce qui permet de s'assurer au maximum que les résidus proviennent bien des sièges. Pour les échantillons prélevés sur la mousse de rembourrage encore en place, j'ai essayé dans les limites du possible de les réaliser à l'arrière des blocs de mousse, pour limiter leur visibilité. Par ailleurs, comme une housse recouvre l'ensemble des sièges, le choix de l'emplacement pour éviter les perturbations visuelles n'a eu que peu d'importance. Le choix s'est donc avant tout porté sur la pertinence des surfaces échantillonnées (*plan de localisation des échantillons en annexe 4, fig.9, p.14*)

Choix du nombre

Le nombre dépend en grande partie des différentes mousses mis à jour lors de l'observation *in situ* et des différents états de surfaces qu'elles présentent. Dans le cas présent plusieurs mousses ont pu être identifiées (7 à proprement parlé pour le rembourrage) de par leur couleur et consistance, lesquelles

ont toutes été échantillonnées afin de vérifier par la suite si elles sont malgré tout de même nature. De plus, les différents états de conservation présentés au sein d'un même bloc de mousse ont été échantillonnés, de manière à mettre à jour si cela a une quelconque influence sur la composition chimique du matériau³⁴.

Choix de la taille

Pour les tests que j'envisage d'effectuer, les échantillons révèlent du micro-prélèvement, soit pas plus de quelques mm³³⁵. Afin que les tests puissent être réalisés plusieurs fois, au besoin et que leurs dimensions puissent me permettent d'apprécier, leur couleur et leur consistance, le conservateur a consenti à ce que j'en prélève plus que le minimum, soit des échantillons d'environ 1 cm³. De plus, il est important de préciser que la mousse de rembourrage présente en général un état de conservation particulièrement péjoré et qu'aucune solution à l'heure actuelle n'est envisagée pour y remédier. Cette précision a son importance dans mes choix de prélèvements, non parce qu'elle me permet de déroger à tous les grands principes d'échantillonnages précités mais parce qu'elle me donne une plus grande marge de manœuvre quant aux nombre et grandeurs des échantillons prélevés, de manière à maximiser les chances d'identification et de procéder aux tests dans les meilleures conditions.



Figure 29 Pour les tests d'identification seul un échantillon de petite taille suffit.

Personnes autorisées à effectuer le prélèvement

L'opération d'échantillonnage doit être effectuée par un personnel qualifié du domaine de la conservation-restauration des objets du patrimoine et autorisé par le responsable des collections. Toute autre personne doit effectuer l'opération sous supervision d'une personne qualifiée.

Méthodes d'échantillonnage (outils, procédé, normes hygiènes-sécurité...)

L'opération d'échantillonnage requiert un matériel spécifique. Avant de procéder au prélèvement à proprement parlé, il est essentiel de documenter suffisamment l'emplacement (photographies,...). Pour limiter au maximum toutes contaminations, l'échantillonnage doit être effectué avec des outils propres³⁶. Le port de gants et d'un masque de protection est également vivement conseillé, non seulement pour éviter la contamination mais aussi pour des questions d'ordre sanitaires. Pour le

³⁴ Une vingtaine de microéchantillons ont ainsi été prélevés

³⁵ Pour information, 1mm³ suffit pour une analyse FTIR, et un « point sur un i » est suffisant pour les les micro-tests chimiques envisagés. Gold, FTIR + micro-chimique.

³⁶ La propreté des échantillons est un facteur important de la réussite d'une campagne d'identification. Outre l'utilisation d'outils propres, l'échantillon doit l'être également. Ceci peut nécessiter un dépoussiérage de la mousse en surface avant prélèvement, de manière à retirer un maximum de dépôts exogènes (en veillant à ce que l'opération ne dégrade pas la structure du matériau). Degryny, 2014, *non publié*

prélèvement des résidus présents à proximité des sièges, l'utilisation d'une pince est recommandée. Un outil tranchant tel un scalpel ou cutter peut être utilisé pour prélever à même la mousse. Il est important que ce type de prélèvement soit réalisé avec une certaine symétrie, de manière à pouvoir être distingué facilement par la suite et pouvoir le différencier des autres types d'altérations présentes sur le matériau. Une fois le prélèvement fait, ce dernier est placé dans un sachet *Minigrip*[®] afin de limiter une fois de plus les risques de contamination. Ce dernier doit également porter le numéro d'identification du prélèvement, pour être en tout temps reconnaissable. Une fiche de données d'échantillonnage (comme présentée en annexe) doit être complétée pour chaque prélèvement effectué, ceci pour des raisons évidentes de traçabilité de l'opération.



Figure 30 Matériel nécessaire: Gants, sachet PE, masque, mètre, appareil photographique, échelle colorimétrique, étiquettes, cutter, scalpel, pinces, lampe de poche, stylos, marqueurs, loupe, ruban adhésif

Identification de l'échantillon

Il faut identifier de façon appropriée et permanente chaque échantillon avec un code d'identification spécifique, pour qu'il puisse être à tout moment reconnaissable. En m'inspirant de la construction des numéros d'inventaire attribués aux biens patrimoniaux, j'ai décidé que chaque échantillon disposerait d'une cote établie de la sorte : TI (pour Tests d'Identification³⁷) placé au début, suivi du numéro de l'échantillon (correspondant à l'ordre dans lequel j'ai effectué mes prélèvements) et enfin 15, qui reprend les deux derniers chiffres de l'année en cours (2015). Ainsi le premier prélèvement effectué porte le code d'identification TI.01.15. Par ailleurs, il n'est pas approprié de retranscrire tous les codes d'identification à même l'échantillon (pour des raisons évidentes de places mais aussi d'interaction entre l'encre utilisé et le polymère qui pourraient mener à des changements de surfaces

³⁷ Code que le lecteur puisse retrouver facilement

indésirables)³⁸. C'est pourquoi ils doivent systématiquement être contenus dans leur sachet respectif sur lequel est retranscrit le code d'identification.

Emballage de l'échantillon

Les tests d'identifications pour lesquels les échantillons sont destinés ne se réalisant pas sur le même lieu, il est essentiel que ces derniers soient emballés en conséquence. C'est pourquoi, en plus du *Minigrip*[®] dans lequel ils sont placés, ces derniers seront disposés dans une boîte rigide en PP afin d'éviter au maximum toutes dégradations mécaniques lors du transport. Cette boîte contenant les échantillons sera ensuite placée dans une armoire, protégée de toute source lumineuse.



Figure 31 Boîtes de protection en PP des échantillons prélevés

Avenir des prélèvements restants

Comme il s'agit de micro-prélèvements, les chances de pouvoir conserver encore une partie de ceux-ci après les tests sont minces (surtout que les tests micro-chimiques et l'analyse FTIR sont de nature destructifs). Par ailleurs, tout doit être fait pour les conserver au maximum en fin de traitement. S'il s'avérait qu'il en reste, ces derniers pourraient trouver une certaine utilité pour le musée, s'il désirait effectuer par leurs propres moyens d'autres tests. Dans cette optique, ils pourraient leur être restitués (bien qu'à l'heure actuelle le conservateur n'ait pas émis le besoin de les récupérer).

La fiche de données d'échantillonnages doit être complétée pour chacun des échantillons prélevés, ceci dans un souci de traçabilité des opérations menées et d'identification des prélèvements. A titre d'exemple, la fiche présente ci-dessous a été remplie selon l'échantillon 1 prélevé *in situ*³⁹.

³⁸ Les collections constituées de polymères synthétiques font partie des catégories dont il est vivement déconseillé de marquer à même leur surface. Fenn, 1993, 349-350

³⁹ Un tableau récapitulatif des différents échantillons prélevés et des codes d'identification associés est à consulter en *annexe 10, p.37-41*.










Fiche de données d'échantillonnage	
Données générales	
Code d'identification de l'échantillon	TI.01.15
But de l'échantillonnage	Tests/analyses d'identification
Etude projetée	Observation microscope optique et MEB/ Tests microchimiques/Analyse FTIR
Identification du bien culturel	
Numéro d'Inventaire	996/65/1
Nom/sujet	Avion de ligne : Caravelle 12 (siège)
Auteur/Origine	Société Nationale Industrielle Aérospatiale
Date/Période	1971
Emplacement	Musée de l'Air et de l'Espace, site de Dugny.
Ville, pays	Paris, France
Propriétaire	Musée de l'Air et de l'Espace
Identification de l'échantillon	
Date du prélèvement	28.04.2015
Nom du préleveur et superviseur	Baptiste Prétôt
Emplacement du prélèvement	Siège passager 3F (modèle 1) ; partie centrale du dessous du coussin d'assise.
Description de l'échantillon	Mousse de couleur gris/marron +/- foncée, plutôt douce au toucher. Elle est très peu collante/pulvérulente et reprend sa forme après pression (type A1)
Photographie de l'échantillon	 <p style="text-align: center;">Figure 32 Echantillon TI.01.15</p>
Méthode d'échantillonnage	Découpe de l'échantillon au scalpel – Identification-Placement dans un sachet <i>Minigrip</i> [®]
Autres informations	-



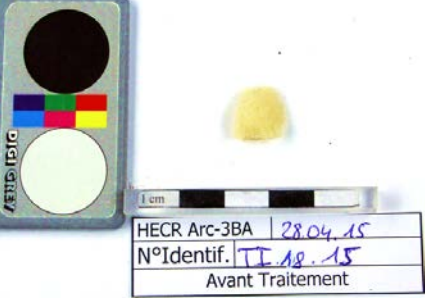
Tableau récapitulatif des échantillons prélevés





Tableau 4 Récapitulatif des échantillons prélevés

Tableau récapitulatif des échantillons prélevés			
Date : 28 et 29.04.2015		Nature de l'échantillonnage : micro-prélèvements pour tests/analyses d'identification	
Préleveur : Baptiste Prétôt		Lieux : Musée de l'Air et de l'Espace, Paris, Caravelle 12	
Code	Emplacement	Type	Photographie
TI.01.15	Siège passager 3F (modèle 1) ; partie centrale du dessous du coussin d'assise.	A1	
TI.02.15	Siège passager 3F (mod. 1) ; bordure du dessous du coussin d'assise + rabat	A2	
TI.03.15	Siège passager 3F (mod.1) ; flancs du coussin d'assise	B	
TI.04.15	Siège passager 3F (mod.1) ; surface de dessus du coussin d'assise	A3	

<p>TI.05.15</p>	<p>Siège 3F (mod.1) ; arrière du coussin du dossier</p>	<p>C1</p>	
<p>TI.06.15</p>	<p>Siège 3F (mod.1) ; flancs du coussin du dossier</p>	<p>B</p>	
<p>TI.07.15</p>	<p>Siège 3F (mod.1) ; tête du coussin du dossier</p>	<p>D2</p>	
<p>TI.08.15</p>	<p>Siège 3F (mod.1) ; avant du dossier</p>	<p>D1</p>	
<p>TI.09.15</p>	<p>Siège 3f (mod.1) ; mousse dure présente en périphérie de l'arrière du dossier</p>	<p>I</p>	

TI.11.15	Siège 28 C ; 2x sur coussin d'assise (sur le dessus et le pourtour du dessous)	D1 et A2	 <p>HECR Arc-3BA 28.04.15 N°Identif. TI.11.15 Avant Traitement</p>
TI.12A.15	Siège 21C ; sur partie basse de l'arrière du coussin du dossier (structure en nid d'abeille)	C1	 <p>HECR Arc-3BA 28.04.15 N°Identif. TI.12A.15 Avant Traitement</p>
TI.12B-C.15	Siège 21C : coussin du dossier (Flanc (B) et dessus (C))	B et D1	 <p>HECR Arc-3BA 28.04.15 N°Identif. TI.12B.15 Avant Traitement</p>
TI.14.15	Sur le sol ; en dessous du siège 2A	B	 <p>HECR Arc-3BA 28.04.15 N°Identif. TI.14.15 Avant Traitement</p>
TI.15.15	Sur le sol ; en dessous du siège 22D	B	 <p>HECR Arc-3BA 28.04.15 N°Identif. TI.15.15 Avant Traitement</p>

<p>TI.16.15</p>	<p>Sur le sol, en dessous du siège 13F</p>	<p>B</p>	
<p>TI.17.15</p>	<p>Sur le sol, en dessous du siège 18F</p>	<p>B</p>	
<p>TI.18.15</p>	<p>Tabouret ; dossier</p>	<p>F</p>	
<p>TI.19.15</p>	<p>Siège Stewart ; dossier commun</p>	<p>G</p>	
<p>TI.20.15</p>	<p>Tabouret - coussin d'assise</p>	<p>E</p>	

TI.21.15	Siège 2D ; accoudoir	H	
TI.22.15	Sur le sol de la cabine passagers (en dessous des sièges 9C et 24F)	B	
Autres Prélèvements			
Code	Emplacement	Type	
TI.23.15	Sur le sol ; en dessous du siège 9A	lin	
TI.24.15	Sur le sol ; en dessous du siège 7A	Caoutchouc	







Annexe 11 : Tests de flottaison et de densité

Tests de flottaison

Dans les tests miniaturisés, F. Rémillard propose des tests de flottaison en solution aqueuse saturée⁴⁰ pour définir la gravité spécifique des échantillons, qui peut contribuer à l'identification de leur nature (au même titre que la masse volumique, chaque matériau et mousse étant caractérisé par une gravité spécifique). Les mousses de polyuréthanes sont censées flotter sur l'eau. C'est pourquoi j'ai testé plusieurs échantillons dans une coupelle de verre remplie d'eau du robinet (gravité spécifique de 1.00) à 20°C. Ce test est également pertinent notamment pour déceler le comportement des mousses comprenant une charge minérale importante (foncée).

⁴⁰ Rémillard, 2007, p.6-24

Tableau 5 Résultats des tests de flottaison

Résultats obtenus		
N° Echantillon	Comportement	Schéma
TI.01.15	Flotte très bien à la surface (même après plusieurs minutes), ne se gorge pas d'eau	
TI.06.15	Flotte au départ, puis après quelques minutes (3) coule. De plus, il se décompose dans l'eau.	
TI.05.15	Flotte (mais beaucoup moins bien que le 1), presque entièrement immergé.	
TI.07.15	Flotte très bien, similaire à 1	
TI.23.15	Similaire à 1 et 7	
PE neuve ⁴¹	Flotte le mieux !	

⁴¹ Permet de faire une comparaison avec d'autres mousses et d'autres états de conservation. Ainsi en décelant des différences de comportement, cela peut aider à caractériser la mousse et l'identifier.



Figure 33 Les mousses claires présentent une meilleure flottaison que celle de couleur foncée.



Figure 34 La mousse de type B, de par son état dégradé et sa charge potentielle inorganique coule rapidement ⁴²

Ce test doit être effectué après celui de densité (sinon l'échantillon risque de se gorger d'eau et augmenter son poids), mais logiquement avant les tests impliquant une pyrolyse.

Test de densité ⁴³

Un polymère peut également être caractérisé par sa masse volumique ou densité. Pour ce faire je me suis basé sur la densité d'une mousse de PUR du marché (neuve) et une plus dégradée (avérée être de la mousse PU) ce qui m'a donné une fourchette de 25-50 kg/m³ comme densité de référence. Bien entendu, dans la situation présente les échantillons de mousses prélevés présentent pour la plupart un état de dégradation avancé, pas forcément similaire en tout point sur l'échantillon dégradé de référence, ce qui peut avoir une influence sur la densité obtenue. C'est pourquoi les résultats de ce test ne sont pas à prendre comme une mesure absolue, mais ils donnent un ordre de grandeur approximatif qui peut aider à l'identification du produit.

La procédure pour réaliser ce test n'étant pas forcément explicité par Rémillard, j'ai procédé ainsi :




1. Découper un échantillon de 1 cm³ le plus précisément possible⁴⁴.
2. Peser sur une balance de précision (en veillant à ce que cette dernière soit tarée sur 0 avant la mesure !)
3. Comparer la mesure avec celle de référence

⁴² Une fois de plus les tests mettent en avant la présence potentielle d'une charge minérale dans la composition de la mousse

⁴³ Test également suggéré par Rémillard, 2007, p.26

⁴⁴ La taille de l'échantillon peut être revue à la baisse si la grandeur du prélèvement effectué ne le permet pas (0.5 cm³), l'important étant de connaître le volume de l'échantillon à peser.

Tableau 6 Résultats des tests de densité

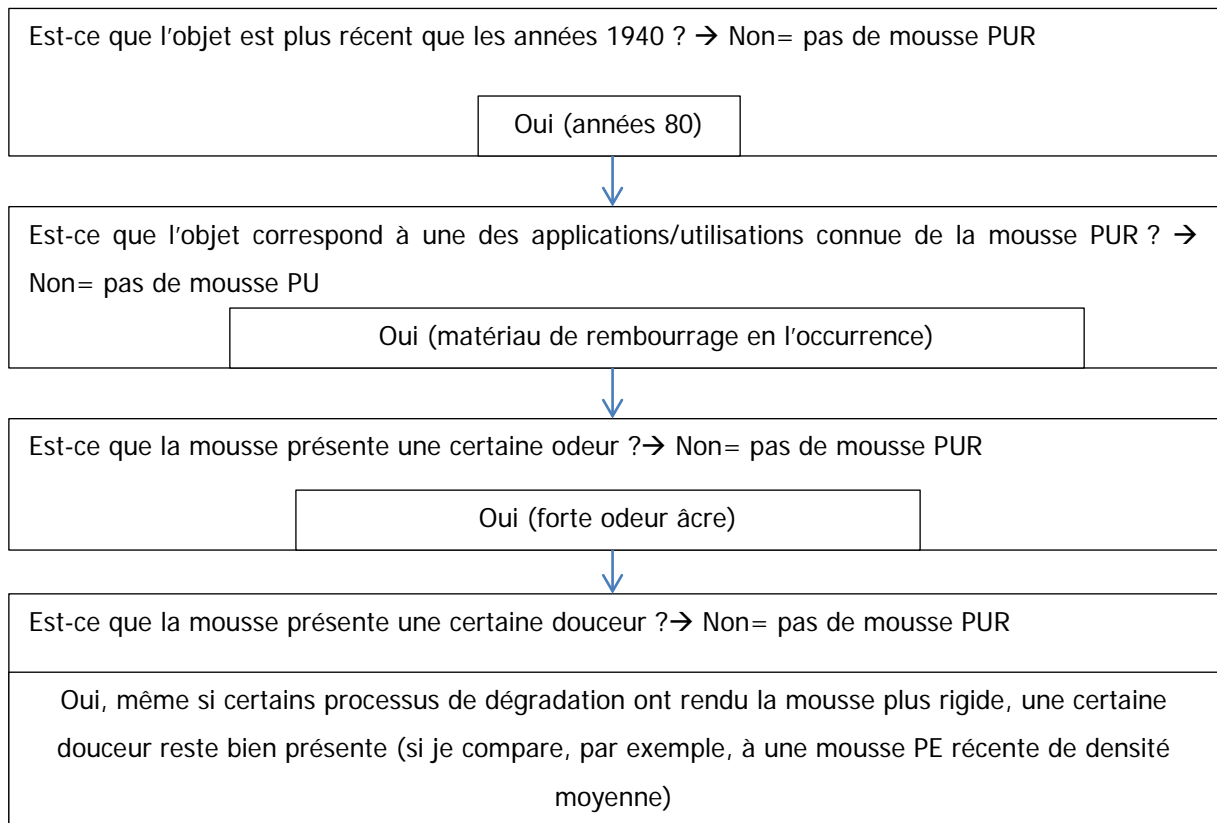
Résultats obtenus		
N°Echantillon	Densité	Photographie
TI.06.15	0.08g/cm ³ ou 80kg/m ³	
TI.23.15	0.4 g/cm ³ ou 40 kg/m ³	
TI.08.15	0.5 g/cm ³ ou 50 kg/m ³	

En prenant en compte une marge d'erreur due à l'état de conservation des mousses et à la découpe de l'échantillon à peser, les résultats obtenus sont de l'ordre de grandeur des mousses de PUR (en comparaison la densité d'une mousse PVC est située aux alentours des 200kg/m³), en observant malgré tout une certaine perte de légèreté générale due probablement aux processus de réticulation propres au vieillissement de la mousse. De plus, les échantillons TI.06.15 (mousse type 2) et présentent assez distinctement une densité plus importante que le reste. On peut donc suspecter qu'elles contiennent dans leur composition une charge minérale.

Annexe 12 : Tableau chronologique de l'apparition des quelques « plastiques »

Tableau 7 Historique des plastiques

Date	Nom	Acronyme
1838	Caoutchouc vulcanisé	(caoutchouc)
1868	Nitrate de cellulose	(nitrocellulose)
1900	Caséine (Allemagne)	-
1909	Phénol formaldéhyde	PF (bakélite)
1919	Caséine (USA)	-
1924	Acétate de cellulose	AC
1928	Urée Formaldéhyde Chlorure de polyvinyle	UF PVC
1934	Polyméthyle méthacrylate	PMMA
1935	Polystyrène	PS
1936	Acétate polyvinylique	PVA
1938	Polyamides	PA
1941	Polytéréphtalate d'éthylène	PET
1942	Polyéthylène	PE
1943	Polyuréthane	PUR
1947	Epoxy	EP
1948	Acrylonitrile-butadiène-styrène	ABS
1954	Polyester insaturés (France)	UP
1955	Polyéthylène haute densité	PEHD
1957	Polypropylène Polycarbonate	PP PC

Annexe 13 : Questionnaire d'identification de la mousse PUR

Si le questionnaire ci-dessus débouche systématiquement sur la réponse positive, il est fort probable qu'il s'agisse de mousse PUR. Ceci impliquerait qu'elle soit traitée au même titre que le PVC⁴⁵.

La différenciation entre une mousse PUR éther ou ester ne peut clairement s'opérer par les seuls tests explicités ci-dessus. Bien qu'au toucher la mousse PUR éther est plus collante et d'apparence plus brillante que celles ester, plus « sèche et rigide » et moins élastique⁴⁶, ce propos doit être nuancé, car il s'applique avant tout à des mousses neuves. Or en s'altérant, même une mousse de type éther peut devenir dure/cassante (dû à l'oxydation)⁴⁷. Seule une analyse FTIR (ou chromatographie en phase gazeuse) permettra de définir la nature exacte de la mousse.

Annexe 14 : Mesure du pH des vapeurs de combustion

La valeur pH des vapeurs émises par combustion de l'échantillon est également représentative de la nature de l'échantillon en présence.

La procédure est tirée de l'ouvrage de Rémillard consacré à l'identification des plastiques et des polymères⁴⁸.

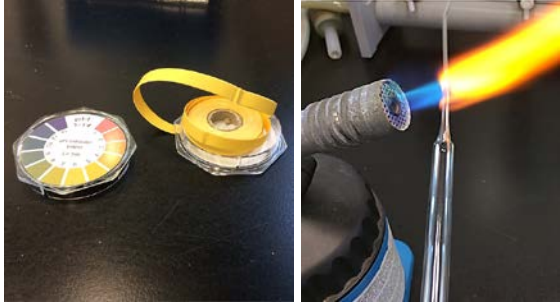
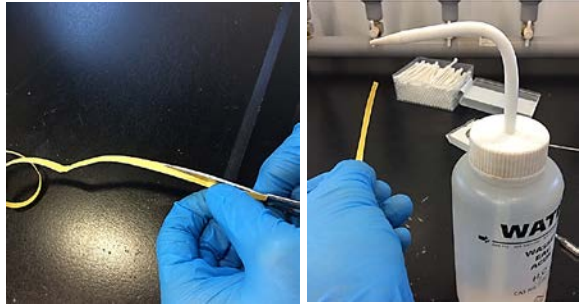



⁴⁵ Coles, 2009, p.129

⁴⁶ Gold, 2004, p.35-36 et Foam Factory, 2011 [en ligne]

⁴⁷ Voir chapitre sur les facteurs d'altérations et leurs effets sur la mousse, p. 2.3.5.

⁴⁸ Rémillard, 2007, p.5-6





Tableau 8 Procédure du test pH

Procédure du test	
	
<p>1. Pour procéder au test, on place tout d'abord un micro-échantillon du matériau à tester dans le fond d'une pipette en verre, préalablement colmatée à la flamme, ainsi qu'une bande indicatrice dans la partie tubulaire.</p>	<p>2. La bande étant souvent trop large, elle peut être découpée en deux dans le sens de la longueur. Elle est ensuite pliée à l'une de ses extrémités et trempée entièrement dans de l'eau (deminéralisée⁴⁹) avant d'être insérée dans la pipette</p>
	
<p>3. La pipette peut alors être refermée par un bouchon (de type plasticine).</p>	<p>4. L'échantillon peut alors être passé à la flamme (méthode dite par pyrolyse)</p>
	
<p>5. Comme les vapeurs de combustion sont plus lourdes que l'air, la pipette doit être déposée à l'horizontale (pendant une dizaine de secondes)</p>	<p>6. La couleur prise par la bande indicatrice peut être lue en selon la charte de couleur fournie par le manufacturier. Les valeurs ainsi obtenues peuvent être comparées à des valeurs, pH de référence, comme celles fournies par Rémillard⁵⁰.</p>

⁴⁹ Ceci pour éviter d'influencer le pH (coloris) de la bande indicatrice.

⁵⁰ Rémillard, 2007, p.23. Ouvrage également disponible en version française et anglaise sur le net

Tableau 9 Résultat des tests pH

Résultats obtenus		
N°échantillon	Valeur pH des vapeurs	Photographie
TI.05.15 (Type C1)	8	
TI.06.15 (Type B)	9.5	
TI.01.15	5	
TI.08.15	4	

On observe ainsi que les mousses de type C1 et B présentent un pH basique, preuve qu'elles comprennent dans leur composition une charge de type basique minérale (probablement un oxyde ou autre composé minéral utilisé comme colorant). Le pH des mousses plus claires et présentant un meilleur état de conservation général tend à être acide, ce qui est plausible en se référant aux valeurs données par Rémillard (pH des vapeurs de combustion de la mousse PUR comprise entre 2 et 4). On constate également que ces dernières ont pu perdre de leur potentiel acide en vieillissant, par

libération de COV organique acides et tendent à se rapprocher d'un pH neutre, soit à gagner une certaine stabilité et inertie chimique.

Annexe 15 : Test au (diméthylamino)benzaldéhyde

Ce test permet d'identifier un composé de type polyuréthane par pyrolyse de produits chimiques mis au contact d'un micro-échantillon du matériau concerné. Pour des raisons de toxicité, ce test doit impérativement être mené sous une chapelle de ventilation.

La procédure est tirée de l'ouvrage de Rémillard consacré à l'identification des plastiques et élastomères par tests miniaturisés⁵¹.

Matériel nécessaire :

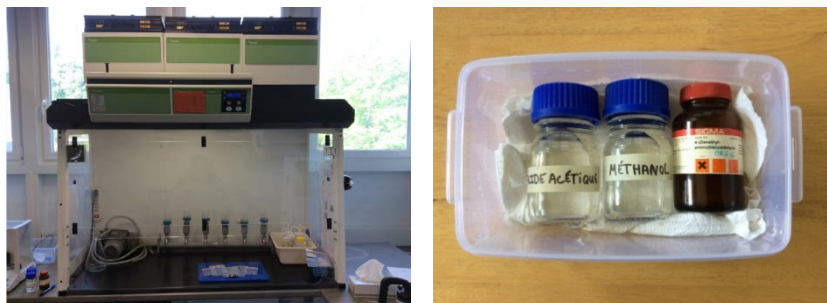


Figure 35 L'opération doit se dérouler sous aspiration (à gauche) au vu de la composition des produits utilisés

Pipette Pasteur (.-10/pce) ; bouchon de Plasticine ; coton-tige ; brûleur à l'alcool ou bec bunsen (flamme douce) ; méthanol ; acide sulfurique concentré ; acide acétique concentré ; p-(diméthylamino) benzaldéhyde (18.-/100gr)⁵².

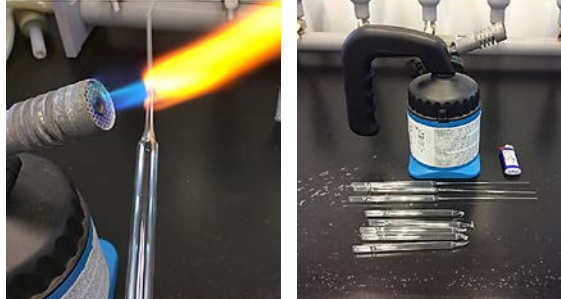





Et préparer les solutions suivantes :

Solution 1- p-(diméthylamino) benzaldéhyde, 14 % dans le méthanol ; **Solution 2-** acide chlorhydrique concentré ou acide acétique concentré.

⁵¹ Rémillard, 2007, p.20-21

⁵² Les fiches techniques des différents produits sont à consulter sur Sigma- Aldrich, 2015 [en ligne].

Tableau 10 Procédure du test diméthylamino(benzaldéhyde)

Procédure du test	
	
<p>1. Préparation de la pipette : colmater l'extrémité capillaire en passant cette dernière sous la flamme du bec-bunsen.</p>	<p>2. Préparation de la solution benzotriazole (14%) dans le méthanol. Pour cela procéder tout d'abord à la pesée des deux produits puis ensuite effectuer le mélange.</p>
	
<p>3. Prélever l'échantillon : le point d'un i suffit (utiliser une lame propre !), puis placer ce dernier dans le fond de la pipette.</p>	<p>4. Préparation du coton-tige : ajouter 2 gouttes de solution 1 et deux gouttes de solution 2 au bout du coton-tige.</p>
	
<p>5. Placer le coton-tige dans la tubulure de la pipette puis refermer l'extrémité avec un bouchon de plasticine.</p>	<p>6. Placer en suite la pipette sur la flamme. Attention : avec le bec-bunsen, la combustion s'effectue rapidement (régler la flamme au minimum)</p>







7. Enfin, observer si un changement de couleur s'opère ou non. Si le coton prend une couleur jaune canari, cela signifie que le test est positif.

Tous les échantillons ont été testés positifs, même la mousse de type I (TI.09.15)

Bien qu'il n'existe aucune réaction connue qui fasse de faux positifs pour cette l'expérience pour m'assurer de sa fiabilité j'ai effectué un test à blanc. En général, avant de lancer une expérience on essaie de la faire sans aucun produit pour voir s'il y a des contaminations. Par exemple s'il y avait du PUR dans le coton-tige, ça influencerait forcément les mesures et on pourrait avoir un résultat positif systématique.

Tableau 11 Résultat des tests (diméthylamino)benzaldéhyde

Résultats des tests	
	
Echantillons avant le test	De gauche à droite: TI.01.15, TI.06.15, TI.08.15, TI.05.15, TI.09.15
	
Après test: tous les échantillons testés présentent une couleur jaune canari, signe que le test est positif	Zoom sur le résultat des tests obtenus

Annexe 16 : Observation sous microscope optique

Principe de fonctionnement

De manière très synthétique, le principe de fonctionnement de base d'un microscope optique consiste à illuminer l'échantillon à analyser par une source lumineuse (ici artificielle), puis à effectuer un grossissement de son image par l'intermédiaire d'un système de double lentilles (de l'objectif et de

l'oculaire). Ce type d'observation se fait généralement en fond clair, autrement dit l'échantillon est visualisé en contre-jour, avec des contrastes plus ou moins claires et des zones colorées selon le niveau d'intensité de la lumière transmise par l'échantillon⁵³. Cette méthode d'observation, certes basique, à l'avantage d'être très abordable, tant du point de vue financier que de son utilisation (en comparaison avec le microscope électronique à balayage). De plus, le dispositif se retrouve fréquemment en laboratoire.

Préparation de l'échantillon

L'échantillon prélevé doit être de très fine épaisseur de façon à être suffisamment transparent. Celui-ci doit être placé entre une lame et une lamelle constituées de verre calibrées, en insérant généralement quelques gouttes d'eau entre les deux surfaces. Ce dernier paramètre permet de faciliter l'aplanissement du prélèvement sur la plaquette mais surtout d'éviter au maximum les phénomènes de réfraction entraînés par le passage de la lumière dans des milieux ne présentant pas un indice de réfraction similaire⁵⁴. Un microscope optique permet, en général, un agrandissement maximal de x1'000 (soit des détails de l'ordre de 0,1 à 0,2 μm). Par ailleurs, l'utilisation d'une huile d'immersion de synthèse est nécessaire pour cet agrandissement au risque de perdre en lisibilité⁵⁵.

⁵³ Sciences ouest, 2002 [en ligne]

⁵⁴ Sagascience, 2008 [en ligne]

⁵⁵ Les interférences causées par le phénomène de réfraction s'accroissent sitôt que l'on augmente l'agrandissement. L'indice de réfraction de l'huile étant très proche de celui des vitrages de la préparation, la réfraction est limitée au maximum et l'image conserve sa qualité.

Images obtenues sous microscope optique

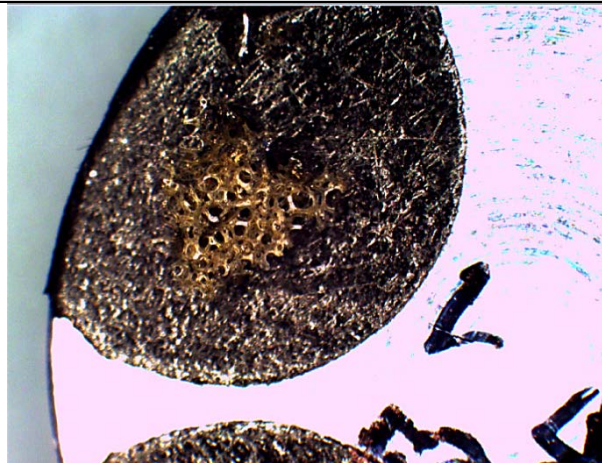


Figure 36 TI.01.15 (x5)

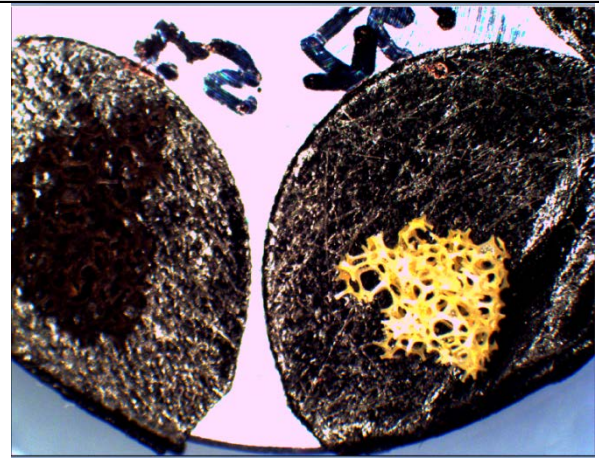


Figure 37 TDI.06.15 et TDI.08.15 (x5)

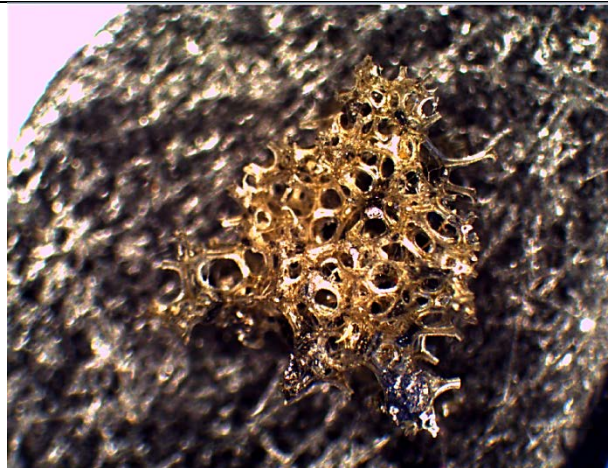


Figure 38 TI.01.15 (x10)

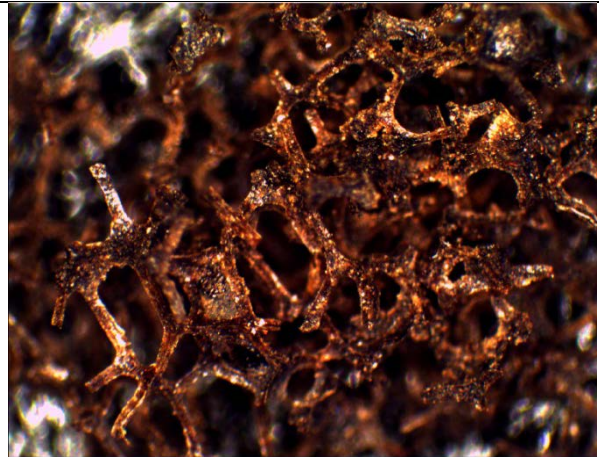


Figure 39 TDI.06.15 (x20)



Figure 40 TD1.06.15 (x10)

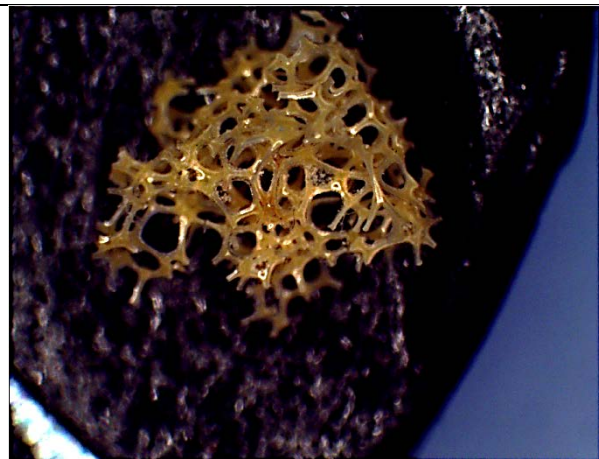


Figure 41 TDI.08.15

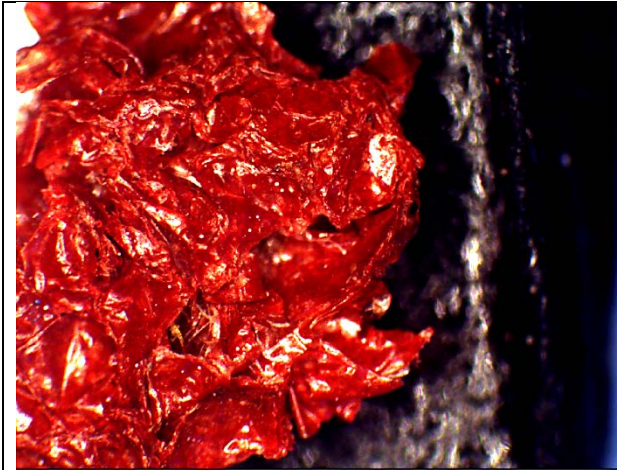


Figure 42 TI.09.15 (x20)

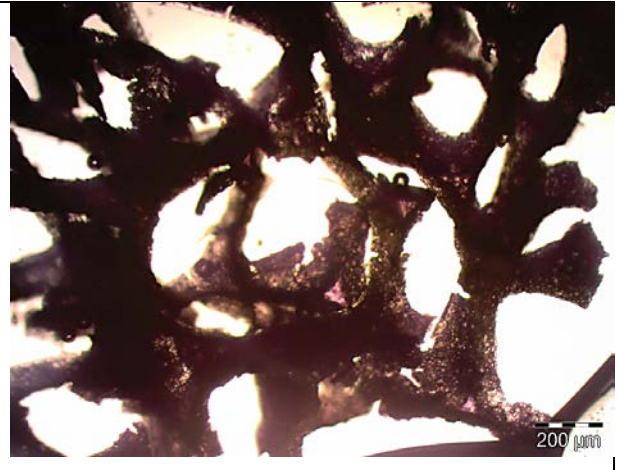


Figure 43 Cellules de mousse PUR partiellement rompues

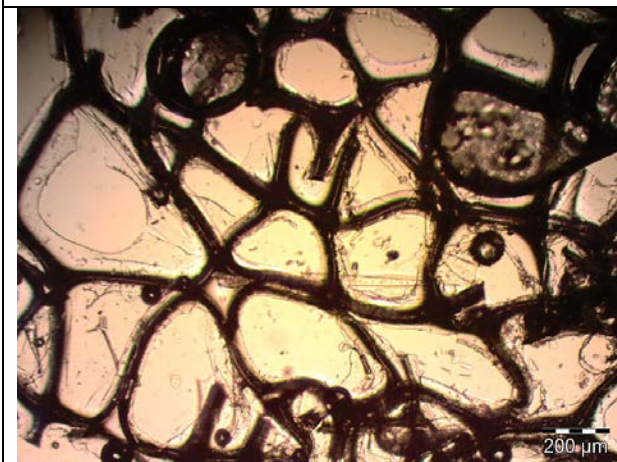


Figure 44 Structure en nid d'abeille caractéristique des mousses PU.

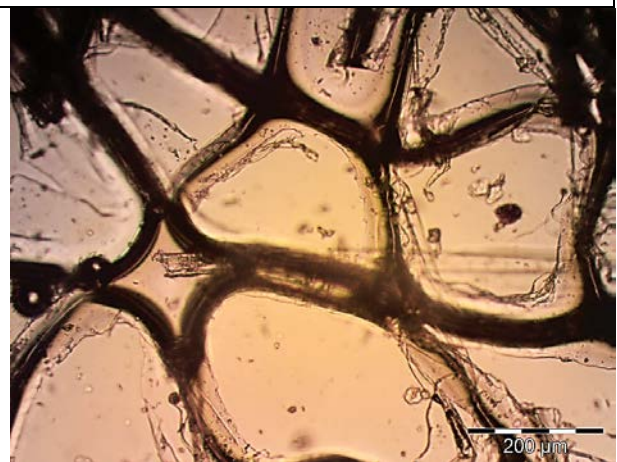


Figure 45 Agrandissement de la structure en nid d'abeille

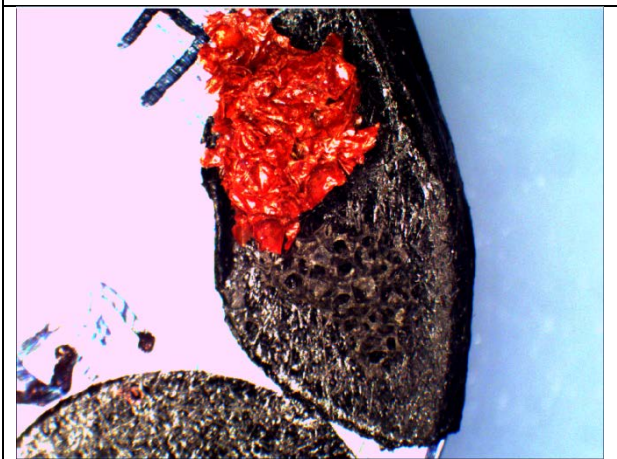


Figure 46 TI.09.15 (x5)

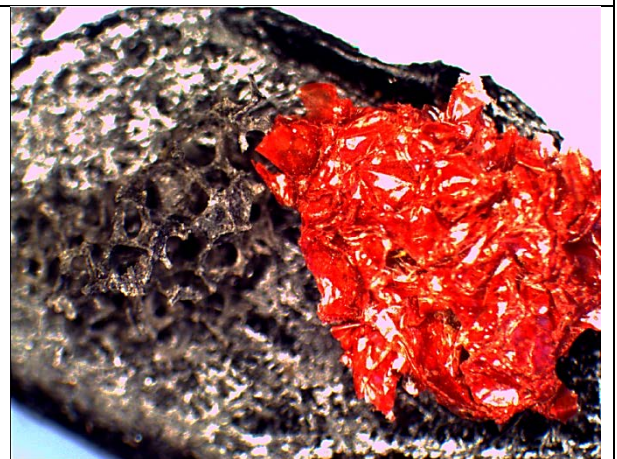


Figure 47 TI.09.15 (x10)

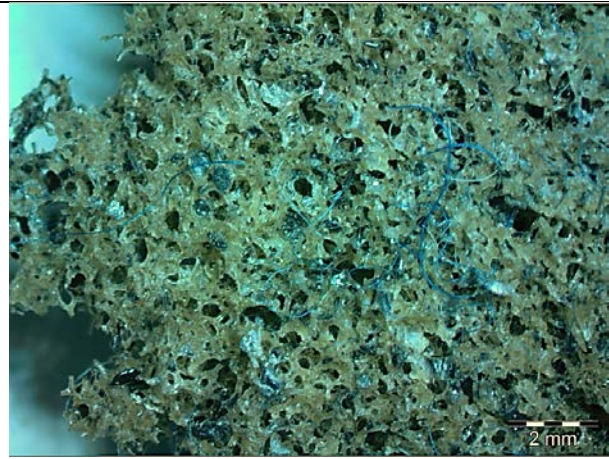


Figure 48 TI.04.15 : Présence de dépôts exogènes (fils) en surface de la mousse

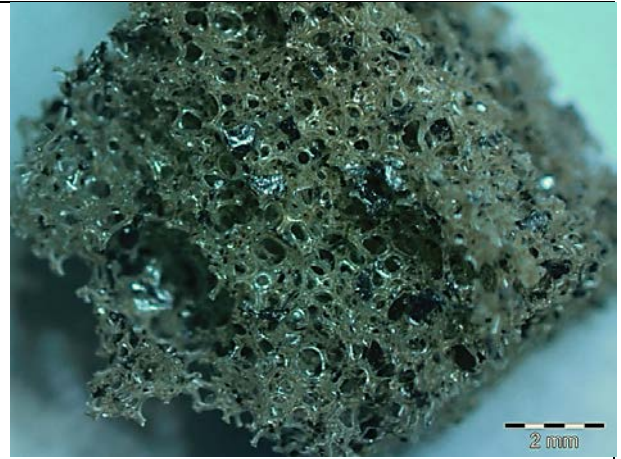


Figure 49 TI.03.15

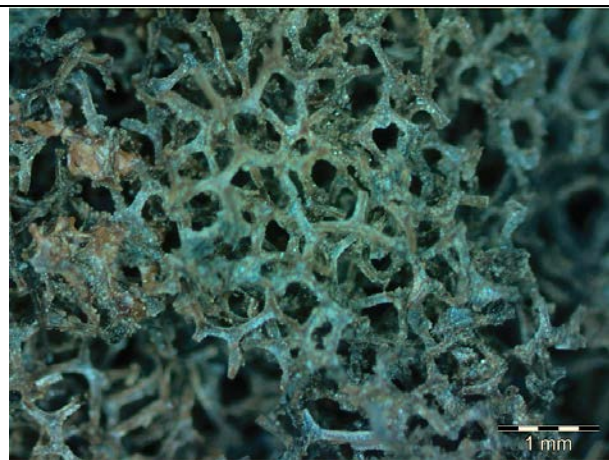


Figure 50 TI.14.15 : Altération de la structure en nid d'abeille 1

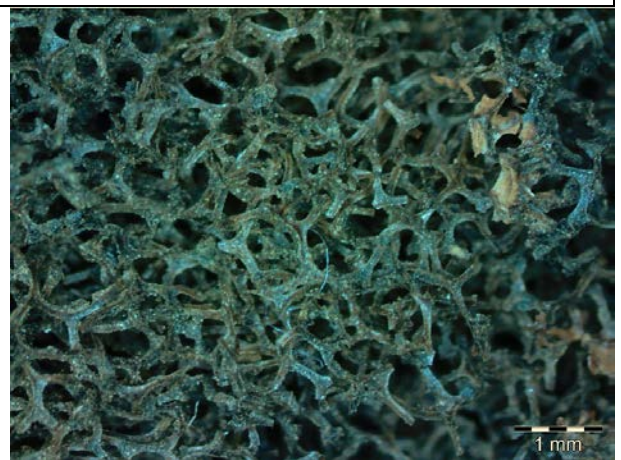


Figure 51 TI.15.15 : Altération de la structure en nid d'abeille 2

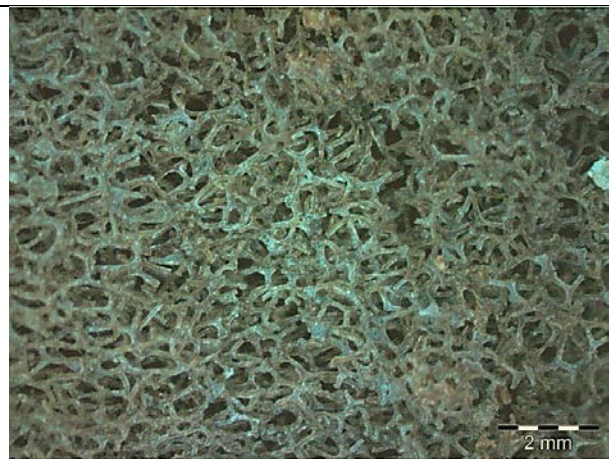


Figure 52 TI.02.15

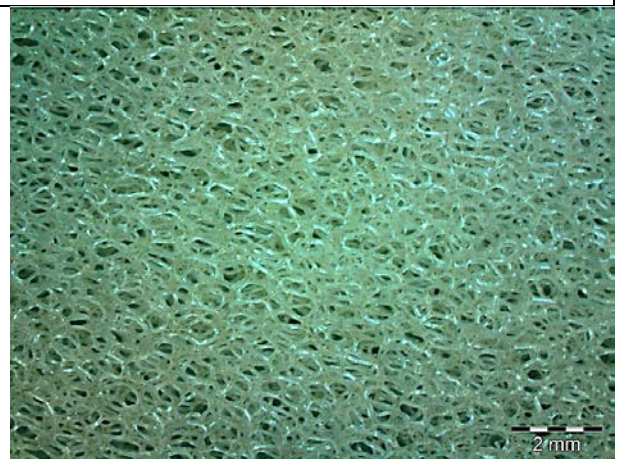


Figure 53 TI.08.15

Annexe 17 : Observation sous MEB et analyse EDS

Le microscope électronique à balayage permet d'observer plus en détails⁵⁶ et avec une meilleure profondeur de champ, la zone à analyser que n'importe quel microscope optique. Pour ce faire, le MEB utilise non plus des photons, mais des électrons⁵⁷ comme source excitatrice, qui disposent de longueurs d'ondes beaucoup plus faibles. Ainsi le MEB projette un mince faisceau d'électrons primaires sur l'échantillon, par l'intermédiaire d'un canon à électron et de lentilles électromagnétiques (condensateurs). Cette interaction va induire une émission d'électrons secondaires⁵⁸ (d'énergie plus faible) et d'électrons rétrodiffusés⁵⁹ par l'échantillon. Ces particules vont pouvoir être captées par le microscope, par l'intermédiaire de détecteurs spécifiques, pour être convertis en signal électrique. Puis comme son nom l'indique, l'opération va être répétée pour chaque point de l'échantillon par un mouvement de balayage très rapide (permis par les bobines à balayages). Enfin, le traitement de l'ensemble des signaux électroniques ainsi obtenu permet de créer des images (en niveau de gris⁶⁰) détaillées du relief de l'échantillon (visible sur un écran d'ordinateur connecté au microscope) qui cartographient la répartition des divers éléments présents (donne disposition des éléments mais pas la composition chimique).⁶¹

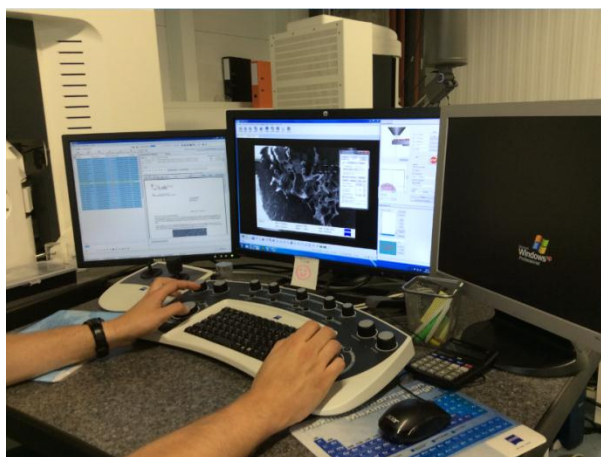


Figure 54 Dispositif MEB-EDS

⁵⁶ Pouvoir de résolution de l'ordre de **1-7 nanomètres** (soit jusqu'à environ 500 fois plus que le meilleur microscope optique)

⁵⁷ Critt, 2011 [en ligne]

⁵⁸ Lors d'un choc entre les électrons primaires du faisceau et les atomes de l'échantillon, un électron primaire peut céder une partie de son énergie à un électron superficiel de l'atome, provoquant ainsi l'éjection de ce dernier (choc inélastique). On appelle électron secondaire cet électron éjecté. MSSMAT, 2013 [en ligne]

⁵⁹ Résultant de l'interaction des électrons du faisceau incident avec les noyaux d'atomes de l'échantillon et qui ont réagi de façon élastique avec les atomes de l'échantillon. Les électrons sont réémis dans une direction proche de leur direction d'origine avec une faible perte d'énergie. MSSMAT, 2013 [en ligne]

⁶⁰ Les éléments les plus lourds apparaissant plutôt en blanc

⁶¹ IPCMS, 2004 [en ligne]

Par ailleurs, associé à un dispositif de spectroscopie en énergie dispersive (EDS), le microscope électronique à balayage permet également d'effectuer de la microanalyse x, autrement dit de l'analyse élémentaire locale sur l'échantillon. Une source d'énergie excitatrice (ici électron) est focalisée sur l'échantillon, interaction qui impliquera la réémission de photons x caractéristiques des espèces chimiques présentes. Ces particules sont récoltées par les détecteurs d'un spectromètre associé au microscope qui permettront de les traiter et de les analyser. L'analyse des surfaces choisies se fait de manière ponctuelle (pointée avec la souris sur l'écran d'ordinateur) et peuvent varier de quelques millimètres à quelques microns. On obtient ainsi en plus de l'image en relief, un spectre composé de pics caractéristiques des éléments présents et de leur concentration (nom des éléments indiqués). Cette technique d'analyse permet d'effectuer non seulement une mesure qualitative de l'échantillon mais également semi-quantitative.⁶²

Par le microscope à balayage électronique et la microanalyse x associée, on obtient donc au final une image électronique de l'échantillon en relief ainsi que des spectres qualitatifs et quantitatifs des éléments caractéristiques du matériau en présence. Les échantillons à analyser doivent être secs (au risque que l'eau ne se vaporise sitôt que l'analyse débuterait, à cause du vide régnant dans le tube microscopique du MEB) et doivent être propres (nécessitant un nettoyage mécanique voire même chimique), plats, réguliers et de taille réduite (1-2 cm).⁶³ En temps normal, on veille à ce que l'échantillon soit conducteur, mais dans la situation présente le chimiste en charge du laboratoire (© Labtox) m'a dit pouvoir obtenir des images de qualité sans devoir procéder à la métallisation des échantillons (ceci à cause de la structure alvéolaire de la mousse).

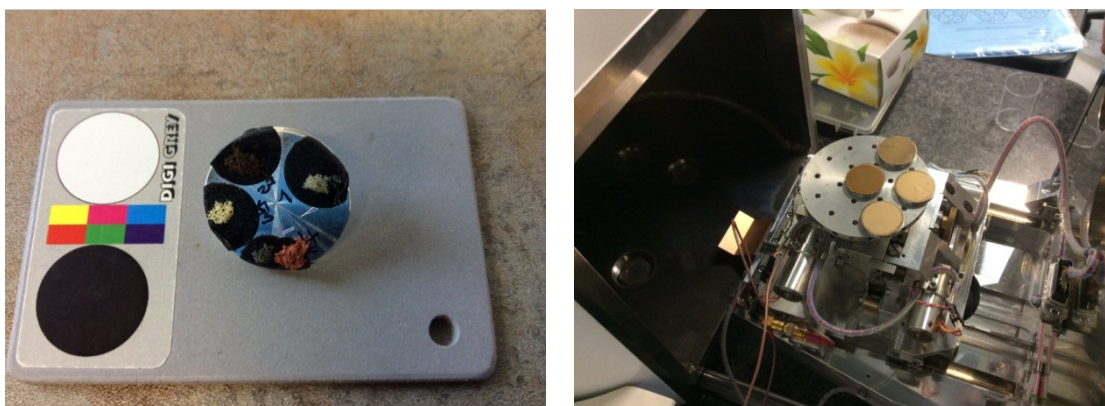


Figure 55 Placement des micro-échantillons dans le dispositif MEB-EDS

Le microscope électronique à balayage est un dispositif qui coûte relativement cher mais qui peut néanmoins se trouver assez fréquemment dans différents types de laboratoires (chimie, étude biologie, médecine,..), rendant ainsi son accès tout à fait possible.

⁶² IPCMS, 2004 [en ligne]

⁶³ Sagascience, 2008 [en ligne]

Images obtenues sous MEB

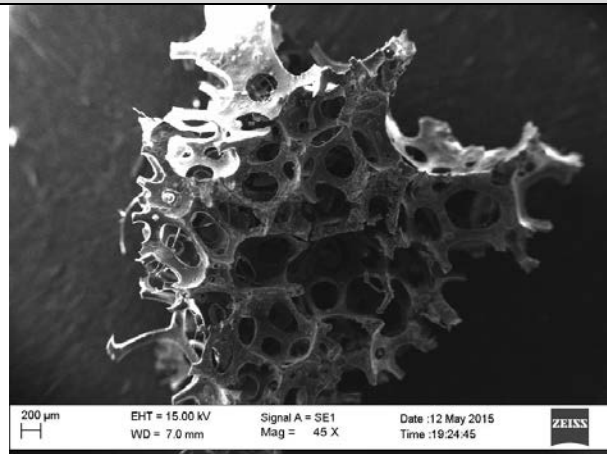


Figure 56 TI.01.15 (1)

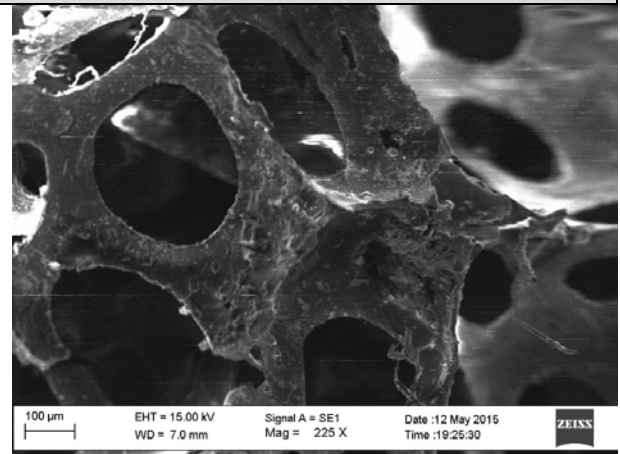


Figure 57 TI.01.15 (2)

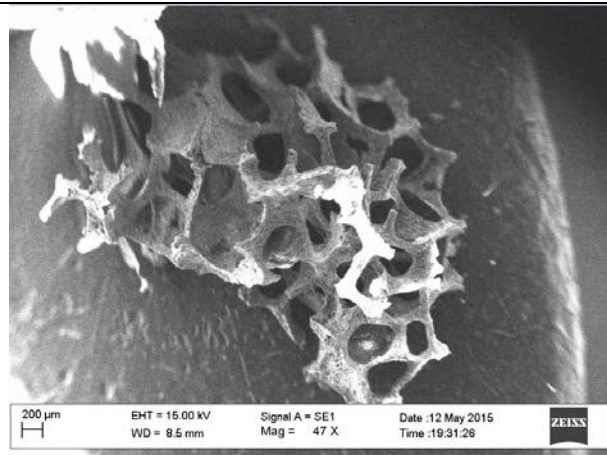


Figure 58 TI.05.15

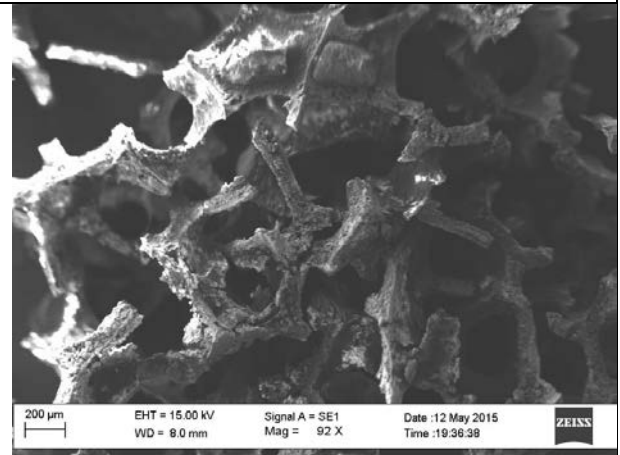


Figure 59 TI.06.15

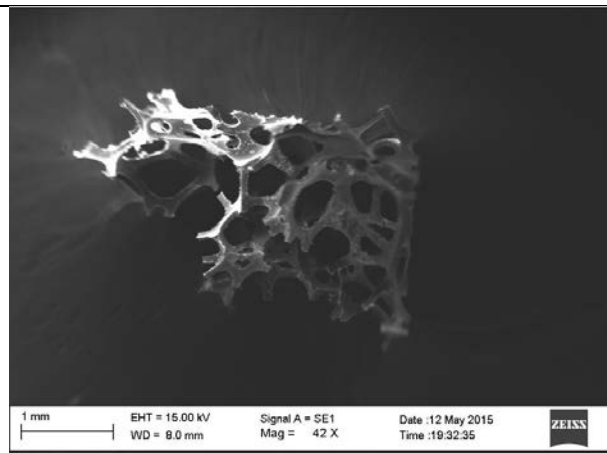


Figure 60 TI.08.15

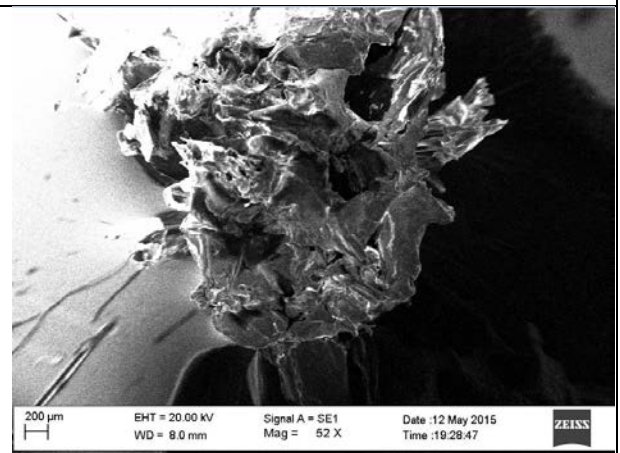


Figure 61 TI.09.15

Résultat des analyses EDS

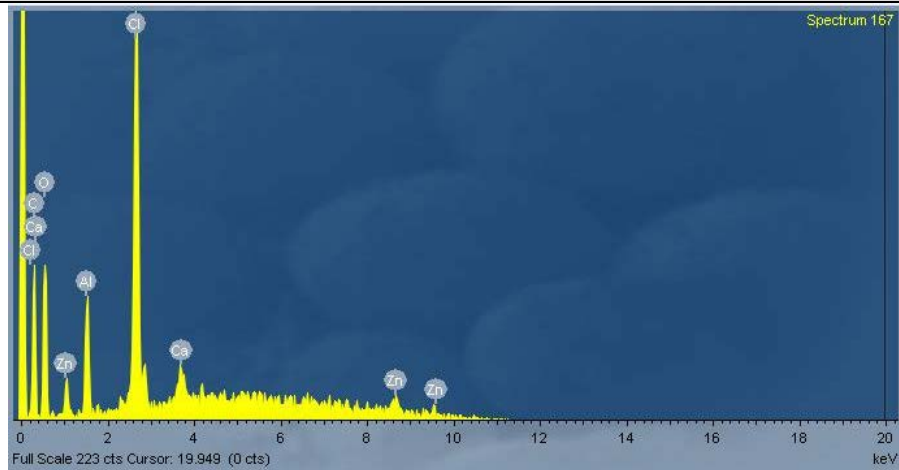


Figure 62 Spectre TI.05.15 (mousse type C1) : Pics carbone (C), oxygène (O) et chlore (Cl) typique des matériaux organiques. Par ailleurs, le pic d'aluminium (Al) indique la présence d'une quantité importante de composés inorganiques dans la composition de l'échantillon (probablement adjuvant : colorant, antioxydant,...)

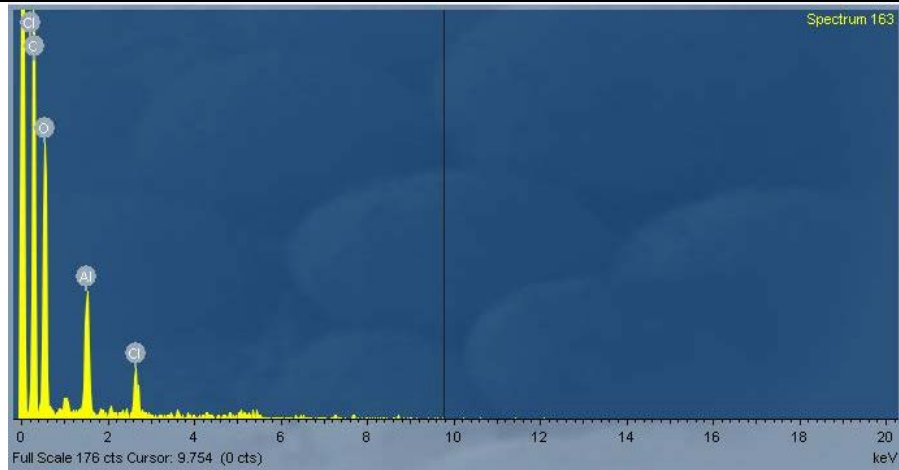


Figure 63 TI.06.15 (mousse type B) : caractéristiques du spectre proche de celui de l'échantillon TI.05.15, avec les pics C, O et Cl bien distincts ainsi que le pic d'aluminium démontrant la présence d'une charge inorganique au sein de ce composé minéral.

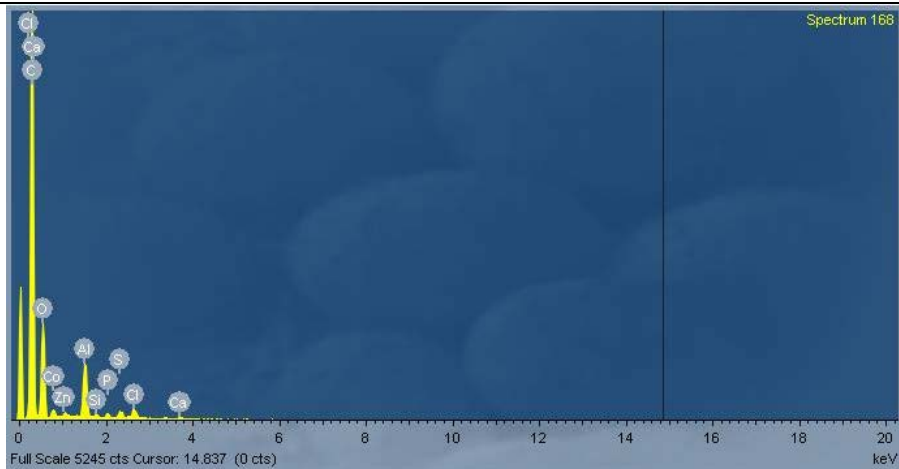


Figure 64 TI.01.15 (mousse type A1) : spectre confirmant la nature organique de l'échantillon. Pas d'autres pics distincts signifiant la présence de composés inorganiques en quantité importante.

Annexe 18 : Analyse FTIR

Principe de fonctionnement

Lorsque l'on irradie une substance avec un faisceau infrarouge, cette dernière transmet un faisceau dont l'intensité est plus faible que celui incident. Cette diminution d'intensité s'explique par le fait que la substance absorbe les fréquences infrarouges caractéristiques de sa composition moléculaire. De manière plus précise, le domaine infrarouge correspond au domaine d'énergie de vibrations des molécules. Ainsi, lorsque la longueur d'onde véhiculée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie vibrationnelle de la molécule, cette dernière va absorber une partie du rayonnement⁶⁴. Cette différence entre le rayonnement incident et celui transmis par l'échantillon (qui correspond à l'énergie absorbée par l'échantillon) est transformée en spectre (grâce à l'outil mathématique de la Transformée de Fourier) caractéristique du matériau analysé. Ce dernier peut ainsi être mis en corrélation avec des spectres de références pour déterminer la nature exacte du composé chimique en présence⁶⁵. L'analyse nécessite le prélèvement d'un échantillon de petite taille (minimum 1mm³).

Mise en œuvre

Comme il n'était pas envisageable (pour des raisons de temps et de coûts⁶⁶) d'identifier l'ensemble des échantillons par FTIR, j'ai décidé de tester les échantillons de mousses les plus présentes dans la composition des sièges et les plus représentatives des différents types observés⁶⁷. J'ai analysé des échantillons ayant également bénéficié des tests microchimiques, de manière à pouvoir démontrer ou non la pertinence/fiabilité de ces derniers.

⁶⁴ Biophy Research, 2012 [en ligne]

⁶⁵ Moffatt, 1995 [en ligne]

⁶⁶ Coûts d'analyse est de 110.-/heure pour une personne externe. L'analyse des 6 échantillons a pris plus de 2h (environ 250.-)

⁶⁷ D'où l'intérêt d'avoir regroupé au maximum par catégorie les différents types de mousses observés (Ex : mousse accoudoir siège 1= mousse assise siège pilote,...)

Tableau 12 Procédure de l'analyse FTIR

Procédure de mise en œuvre	
	
<p>1. Découper un échantillon d'environ 1mm³. La lame du scalpel utilisée doit impérativement être propre pour éviter au maximum toute contamination.</p>	<p>2. Disposer les microéchantillons sur la lame numérotée (1-8-6-5)</p>
	
<p>3. Placer la plaquette dans la chambre, puis pointer avec le cristal de germanium l'échantillon à analyser⁶⁸. Toute l'opération est contrôlée par ordinateur.</p>	<p>4. Après apparition du spectre spécifique de l'échantillon analysé, cherche dans la base de données le spectre de référence correspondant (axe verticale : niveau d'absorption/ axe horizontale : nombre d'ondes (cm⁻¹⁶⁹))</p>

⁶⁸ Attention : du fait de leur grande souplesse et faible densité les mousses sont particulièrement difficiles à maintenir en place pendant l'analyse (bondissent par résilience après avoir été comprimées par la pointe de cristal). C'est pourquoi le paramètre de la pression a dû être augmenté au maximum pour obtenir un meilleur contact (importance également de disposer d'un échantillon de fine épaisseur).

⁶⁹ Correspond à l'inverse de la longueur d'onde

Résultats d'analyses

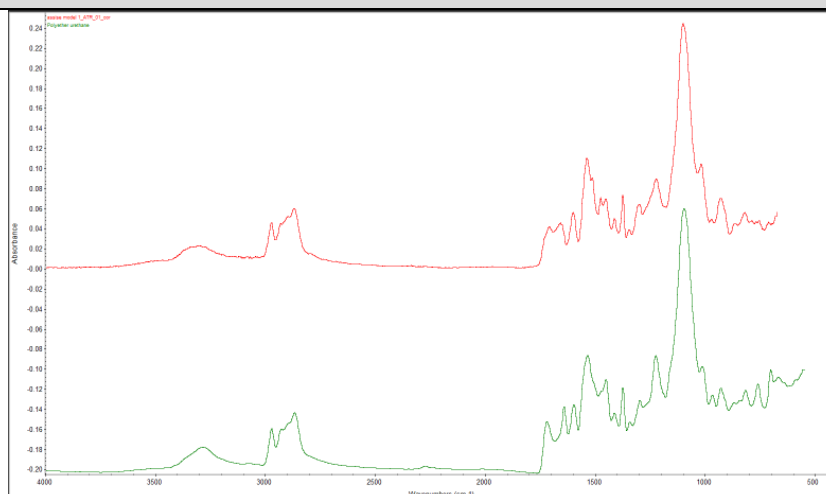


Figure 65 Spectre correspondant à l'échantillon TI.01.15 en rouge et spectre en vert et placé en-dessous

Analyse 1 TI.01.15 (type A1) : échantillon analysé comme étant une mousse de polyuréthane éther, par comparaison avec le **spectre de référence de mousse PUR éther⁷⁰**. En effet, tous deux présentent un enchainement de pics similaires. La comparaison avec un spectre de mousse PUR ester présentait moins de points de ressemblance.

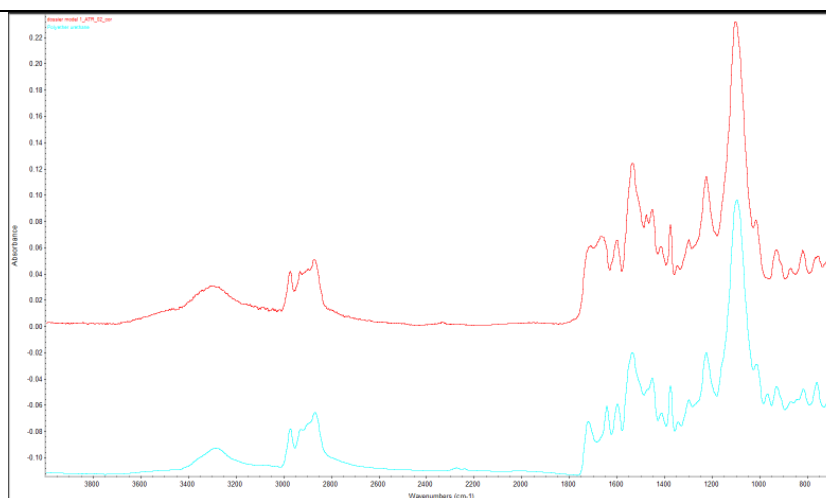


Figure 66 Spectre TI.08.15 en rouge et spectre de référence (mousse PUR éther) en bleu, placé en dessous

Analyse 2 TI.08.15 (type D1) : spectre similaire à celui de référence (mousse PUR éther)⁷¹. Analyse semblable à la 1.

⁷⁰ La campagne d'identification pré-analyses FTIR avait déjà permis de cibler de manière assez précise la nature des mousses en présence, ce qui a facilité l'analyse, notamment dans la recherche des spectres de références correspondant (choix limité PUR éther ou ester)

⁷¹ Même si les deux spectres sont très similaires, il est normal qu'il existe quelques disparités pouvant être dues à l'âge de l'échantillon, ses altération ou encore les additifs rentrant dans sa composition. Pour qu'il y ait correspondance, il faut que les pics principaux et séquences soient retrouvés (zones d'absorption distinctes au nombre d'ondes (cm^{-1}) 3'000 -2800 et 1'800-600.

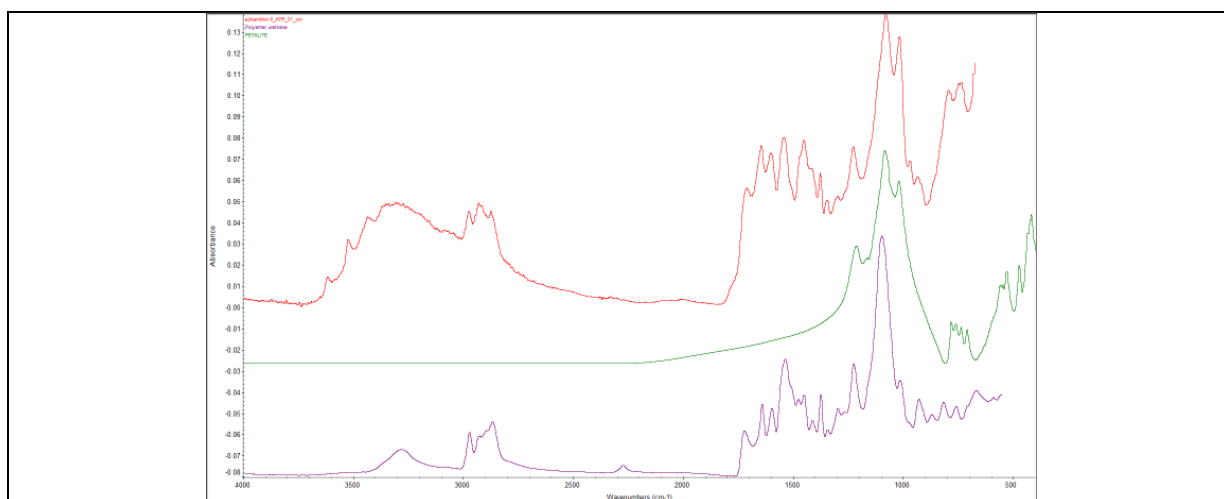


Figure 67 Spectre TI.06.15 en partie supérieure (rouge), spectre de référence de mousse PUR éther (violet) dans le bas et spectre de référence de péalite en vert.

Analyse 3 TI.06.15 (type B) : échantillon analysé comme étant de la mousse PUR éther⁷². Par ailleurs, le spectre obtenu démontre la présence de péalite⁷³ et de phosphate de zinc. Ce dernier est souvent utilisé comme additif pour donner de la couleur au produit⁷⁴. Ceci vient confirmer les impressions obtenues lors de l'analyse au MEB et analyse EDS et la documentation consultée relatant de l'emploi de charges minérales dans la composition des mousses PUR éther. C'est d'ailleurs ces dernières qui sont très probablement à l'origine de la nature basique de certains échantillons (ndlr. Tests pH sur mousse de type B et C1) La séquence de pics distincts, présent en début de spectre (nombre d'ondes (cm^{-1}) compris entre 3600 et 2800) correspond aux liaisons hydroxyles (-OH), marqueur type de la dégradation des matériaux⁷⁵. Ce résultat est cohérent avec l'état de dégradation très avancé observé sur l'échantillon (voir *annexe 8, p.22-27*).

⁷² Le fait que la similarité entre ce spectre et celui de référence est moins évidente est dû à l'état de conservation particulièrement péjoré de l'échantillon.

⁷³ Silicate ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$) comprenant du lithium (métal alcalin)

⁷⁴ Brambilla, 2015, *entretien oral*

⁷⁵ Hauteur du pic proportionnel au niveau de dégradation du matériau : plus celui-ci est important, plus la mousse présente un état dégradé.

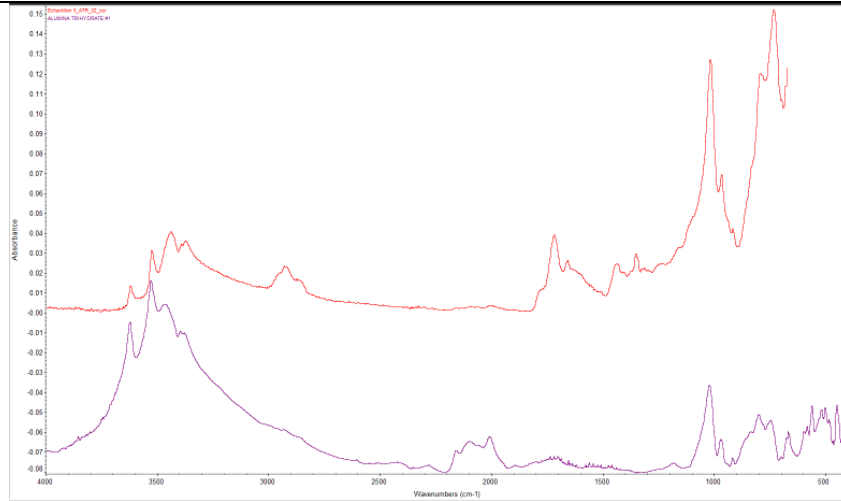


Figure 68 Dans le cas présent, le spectre TI.05.15 (en rouge) présente une grande similarité avec le spectre d'hydroxyde d'aluminium (violet), ce qui tente de démontrer que l'échantillon comprend une charge importante de ce composé minéral au sein de sa composition

Analyse 4 TI.05.15 (type C1) : le spectre, analysé également comme de la mousse PUR éther, relate la présence d'une grande quantité d'oxydes d'aluminium (comme cela avait déjà pu être observé au MEB et analyse EDS) et de liaisons hydroxyles.

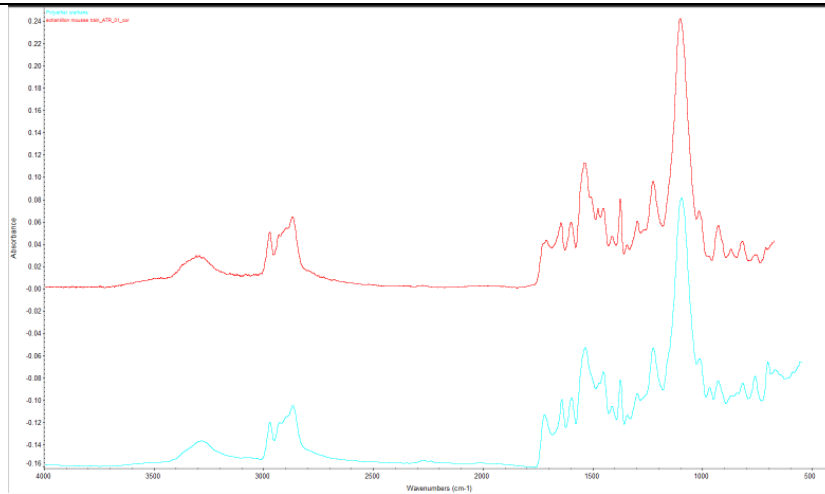


Figure 69 Spectre ...(en rouge) et spectre de référence (mousse PUR éther) en bleu

Analyse 5 TI.20.15 (type E): analyse semblable à 1. Le spectre obtenu est similaire à celui de référence de la mousse PUR éther.

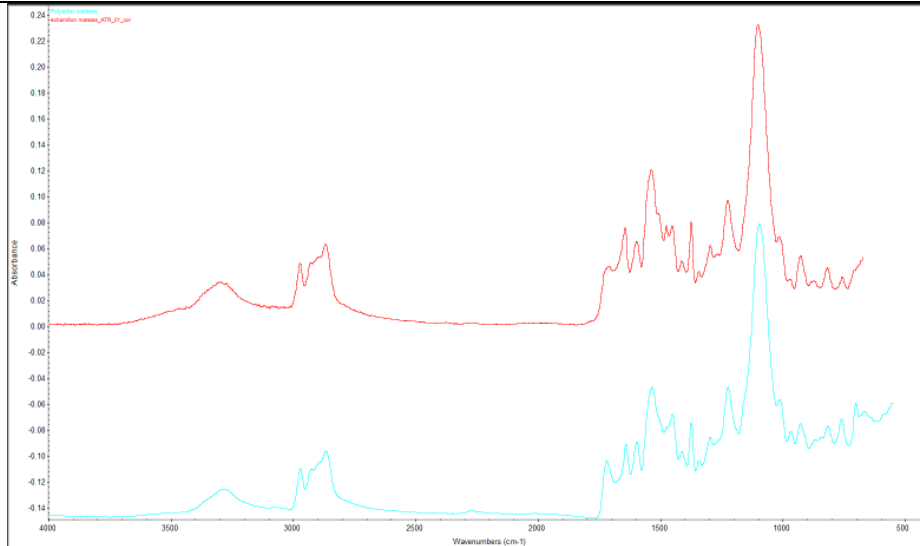


Figure 70 Spectre de l'échantillon du matelas (en rouge) et spectre de référence (mousse PUR éther) en bleu

Analyse 6 Matelas : analyse similaire à 1, 2 et 5. Spectre identifié comme étant de la mousse de PUR éther.

Au vu de ce qui précède, plusieurs observations peuvent être faites. Tout d'abord l'ensemble des échantillons ont été identifiés comme étant de la mousse de PUR éther. Les analyses 1, 2, 5 et 6 ont présenté des spectres quasiment similaires à celui de référence (mousse PUR éther). Dans le cas des analyses 3 et 4 (échantillons de mousses de couleur plus foncée) la similarité était moins marquée, avec la présence d'une quantité importante de charge minérale (pétalite, phosphate de zinc et hydroxyde d'aluminium). De plus, leur concentration en groupe $-OH$ est plus importante ce qui signifie un état de dégradation plus avancé (constat déjà fait lors de la caractérisation des différents types de mousses).

Il existe donc bien une différence notable entre les mousses de couleur foncées et celles claires (d'un point de vue des spectres obtenues et de la composition moléculaire), bien qu'il s'agisse toujours de mousse PUR éther. Les mousses foncées (type C1 et B) démontrent systématiquement la présence d'une grande quantité de charge minérale dans leur composition, que les claires n'ont pas ou du moins en proportion très faible. De plus, au vu de l'état général de conservation des différentes mousses, on remarque que celles de couleur foncées sont plus dégradées que les claires. Ceci démontre peut-être que ces charges minérales, ajoutées le plus souvent pour améliorer les propriétés des matériaux, ont un effet inverse sur le long terme (rendant les mousses plus dures et pulvérulentes avec le temps). Les oxydes d'aluminium, phosphates de zincs, la pétalite et autres composés utilisés comme colorants peuvent donc potentiellement occasionner une dégradation intrinsèque du matériau sur le long terme.

Ainsi, on peut déduire que les additifs ajoutés dans la composition des mousses (notamment les colorants) influencent leur état de conservation et que la composition chimique moléculaire de la mousse est influencée par l'état de conservation.

Annexe 19 : Code de couleur des mousses

Le tableau ci-dessous présente les couleurs les plus fréquentes des mousses et les additifs qui leurs sont associés⁷⁶.

Tableau 13 Code couleur des mousses

Couleur de la mousse	Additifs contenus et comportement
Bleue	- Ralentisseurs de flammes. Ces derniers sont peu volatils, mais peuvent être source de corrosion en cas de contact direct avec un métal. - Pigments servant à masquer le jaunissement
Rose	- Agents statiques (alkyl sulfonate ou sel d'ammonium). Etant des composés très hygroscopiques, ces derniers favorisent la corrosion du métal.
Blanche	-Dioxyde de titane, servant d'anti-jaunissement par absorption des rayons UV. -La mousse blanche est la plus pure
Grise/noire	- Noire de charbon, qui confère une protection efficace contre les ultra-violets et la rend moins électrostatique.

Annexe 20 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physico-chimiques de la mousse PUR éther

Tableau 14 Caractéristiques physico-chimiques des mousses PUR éther

Caractéristiques physico-chimiques générales des mousses PUR éther ⁷⁷			
Formule brute	C6H12N2	Densité habituelle	De 20-50 kg/m ³
Tenue thermique	-40°C à 80°C	Conductivité thermique	0.023-0.028 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Couleur	Ses colorations traditionnelles sont le jaune (des plus pales au plus foncé), le marron ; le blanc crème ; le gris foncé ou encore le noir ⁷⁸ . Par ailleurs,		

⁷⁶ Rémillard, 1995, p.2

⁷⁷ Caractéristiques de la mousse à l'état neuf utilisée dans les années 80-90. Szycher, 1999, p.7 et Trotignon *et al.*, 1998, p.126-128.

⁷⁸ Signe qu'il comporte du noir de charbon.

	aujourd'hui la mousse PUR peut se retrouver dans le commerce sous un vaste panel de couleurs (rose, orange, bleu,...)
Structure	Structure alvéolaire se présentant sous la forme d'un réseau de cellules en nid d'abeille (ouverte ou fermée) à parois épaisses et bien distinctes
Epaisseur	Généralement entre 5 et 10 cm
Danger/toxicité	Les isocyanates contenus dans la mousse sont des substances toxiques et pouvant causer des allergies. De plus, ce matériau est particulièrement inflammable (en cas d'absence de substances ignifugeantes) et sa combustion peut entraîner le dégagement de cyanure d'hydrogène et de monoxyde de carbone, gaz potentiellement mortels.
Principaux avantages	Excellente résistance à la traction, au déchirement, à l'abrasion et aux produits chimiques (solvants ⁷⁹ , huiles) ⁸⁰
Limites d'utilisation	Il faut éviter qu'elle soit en contact direct avec des surfaces métalliques (COV libérés augmente la vitesse de corrosion) et des textiles (risque de tâcher les surfaces annexes). De plus elle est non recyclable.

Annexe 21 : EPI recommandé pour le retrait des mousses de rembourrages

Tableau 15 EPI recommandé

Protection	Modèle et recommandations ⁸¹
Voies respiratoires	Masque (ou demi-masque) anti-poussières classe FFP3⁸² . Les filtres anti-aérosol du masque se colmatent au fur et à mesure (accumulation de particules) et peuvent ainsi gêner la respiration. Il est donc indiqué de les changer toutes les 4 heures et d'effectuer des pauses régulières pour s'aérer au grand air.
Mains	Gants de protection contre les risques mineurs jetables , de type vinyle ou nitrile (éviter le latex à cause du risque potentiel d'allergie). Ces gants permettront d'éviter tous contacts avec les matériaux problématiques (mousse présentant des migrations d'adjuvants, parties des sièges corrodés) pouvant entraîner des allergies et même des maladies plus graves (tétanos).

⁷⁹ Ceci est dû à la nature cristalline de la microstructure de la mousse PUR éther. A l'inverse de zones amorphes, cette dernière empêche les solvants de pénétrer. Mercier et *al.*, 1999, p.236

⁸⁰ A noter également son prix très avantageux et son accessibilité sur le marché, même non spécialisé.

⁸¹ Une liste de fournisseurs est à consulter en annexe, 30, p.118-119.

⁸² L'utilisation de masques anti-poussières FFP2 pourrait également être envisagée, mais pour le retrait d'un matériau (PU) dont on ne connaît pas précisément le niveau de toxicité mieux vaut assurer la protection la plus efficace aux employés en ayant recours à des masques FFP3.

	Jeter les gants dès l'apparition de déchirures ou lors d'une sensation de sudation trop intense au niveau des mains (inefficacité de la protection). ⁸³
Yeux	Lunettes à branches avec protections latérales (verres incolores) ou lunettes-masques . Bonne protection contre les particules/poussières. Se nettoie facilement à l'eau savonneuse.
Tête	Charlotte en non-tissé de PP (ou polyester) ⁸⁴ . A jeter en cas de déchirure ou de changement de site (pour éviter la migration de poussière dans un autre espace).
Reste du corps	Combinaison intégrale en non-tissé de PP (ou coton, polyester, <i>Tyvek</i> [®]). Evite l'intrusion de poussières dans les vêtements qui pourrait entraîner des réactions allergiques cutanées et dans une moindre mesure des risques de salissures. Pour les pieds, pas besoin de chaussures spéciales, mais l'utilisation de couvre-chaussures en non-tissé de PP est conseillé (évite la pénétration de poussières). Protections à jeter en cas de déchirures ou de changement de site ⁸⁵ .

Cet EPI peut paraître conséquente certes, mais aucune des protections mentionnée n'est superflue pour la situation présente. Outre les changements réguliers de masques, gants et autres équipements, d'autres mesures peuvent/doivent être prises pour améliorer le confort des collaborateurs comme l'application de pauses régulières (10 minutes/2h) permettant de s'aérer et s'hydrater⁸⁶. A noter que l'intervention de retrait de la mousse à proprement parlé et du démontage partiel du siège que cela entraîne ne présentent pas de risques mécaniques (pas besoin d'outils/matériel coupant ni d'objet lourd).

Toujours dans le cadre des mesures personnelles, l'hygiène est également un élément important lorsqu'on se retrouve en contact avec des produits dégradés et des déchets divers. C'est pourquoi il faut régulièrement se laver les mains (avant et après les pauses ou encore lors des changements de gants) et prévoir de se doucher à la fin de la journée de manière à évacuer les dernières poussières résiduelles et limiter également le risque de contamination d'autres espaces⁸⁷.

⁸³ c.Stouls, 2015 [en ligne]

⁸⁴ c.Stouls, 2015 [en ligne]

⁸⁵ CV protection, 2015 [en ligne]

⁸⁶ Seghairia, 2015, *échange courriel*

⁸⁷ Seghairia, 2015, *échange courriel*

Annexes 22 : Moyens logistiques inhérents au retrait des mousses de rembourrage

Le retrait de la mousse prend environ 10 minutes⁸⁸ par siège, valable pour les 144 ne nécessitant pas de mesures de conservation-restaurations particulières (autrement dit les 141 sièges passagers, les 2 Stewart et un tabouret de la cabine de pilotage), en comptant l'étape de marquages des housses, soit près de 24 heures de travail pour cette première tâche. A cela viennent s'ajouter les étapes de préparation des espaces de travail (installation des aspirations, tables de travail,...). Pour le nettoyage pré et post intervention, pour les étapes d'élimination des déchets et pour le report des informations relatives à l'intervention et le dépoussiérage des mousses, compter encore 24 heures de travail supplémentaires⁸⁹. Au total, 48 heures de travail à temps plein sont nécessaires pour réaliser l'ensemble de l'intervention. En comptant des journées de 8 heures avec une pause de 10 minutes toutes les 2 heures (soit 40 minutes pour une journée ou 4 heures pour l'ensemble du travail), avec une équipe composée de 2 personnes⁹⁰, il faut compter près de 4 jours pour réaliser la tâche voire plutôt 5⁹¹ si l'on veut compter large et prévoir des ajustements pour d'autres travaux de finition. Par ailleurs, il serait préférable que ce soit des professionnels issus du domaine de la conservation-restauration qui se chargent d'effectuer ce travail, puisqu'il s'agit de traiter des objets constitutifs d'un bien patrimonial classé. Si les limites économiques ne permettent pas de mobiliser deux conservateurs-restaurateurs, il serait envisageable de charger un autre employé de cette tâche, mais sous supervision d'un professionnel du domaine.

Bien que l'intervention ne soit pas très complexes d'un point de vue technique, il est indispensable que chacune des personnes associées au retrait du rembourrage des sièges soit renseignée sur la nature du travail et ses objectifs et qu'elle prenne connaissance, avant tout traitement, des protocoles préétablis, de manière à anticiper au mieux les actions une fois sur le terrain (emmener in situ un exemplaire des protocoles). Chaque personne devrait aussi être sensibilisée à la portée d'une intervention telle que celle envisagée sur les valeurs matérielles et immatérielles de l'objet et des dispositions à prendre pour que les actions soient menées dans le respect de son intégrité⁹². Bien que tout le personnel devrait s'être renseigné sur le projet en général, une réflexion globale et précise plus

⁸⁸ Démontage chronométré en temps réel et répété plusieurs fois.

⁸⁹ Installation et démontage des postes de travail (4h) ; Nettoyage pré et post intervention (5h) ; retranscription des informations liées à l'intervention (2h) ; dépoussiérage des housses (compter 5-6 minutes par housse soit environ 12h au total)

⁹⁰ Les conditions offertes par la cabine n'étant pas des plus évidentes, il est conseillé que le temps passé dans la cabine soit réduit au maximum, d'où le fait de ne pas confier le travail qu'à une seule personne. Par ailleurs, travailler en binôme permet de faciliter la réalisation de certaines étapes du démontage (notamment le déhousseage des dossiers) mais également une meilleure répartition des tâches permettant ainsi de travailler plus efficacement et de gagner du temps. Le nombre de personnes chargées du retrait de la mousse peut être augmenté à 3 ou 4 pour réduire la charge de travail individuelle, mais il est préférable de ne pas aller au-delà, la cabine devenant trop étroite.

⁹¹ Soit une semaine de travail, pour deux postes de travail à 100% (en comptant le week-end)

⁹² Si pas suffisamment bien renseigné, le personnel de musée peut être une source potentielle de dégradation. Mttc et OCIM, 2002, p.21

conséquence passant par une bonne connaissance de l'avion, des sièges, du projet d'intervention et des objectifs associés doit impérativement être opérée par le ou les conservateur(s) ,responsable de la prise en charge des sièges, de manière à pouvoir guider au mieux les autres employés et réaliser l'intervention de manière appropriée. Une connaissance globale du projet d'intervention de conservation-restauration est indispensable pour éviter un travail machinal, systématique et sans réflexion, source de dommages pour les objets. Enfin, il est important de bien documenter les différentes actions menées les difficultés rencontrées ou les changements apportés au projet de départ de manière à conserver une bonne traçabilité des informations et faciliter la compréhension de la mise en œuvre tout au long de la chaîne opératoire.

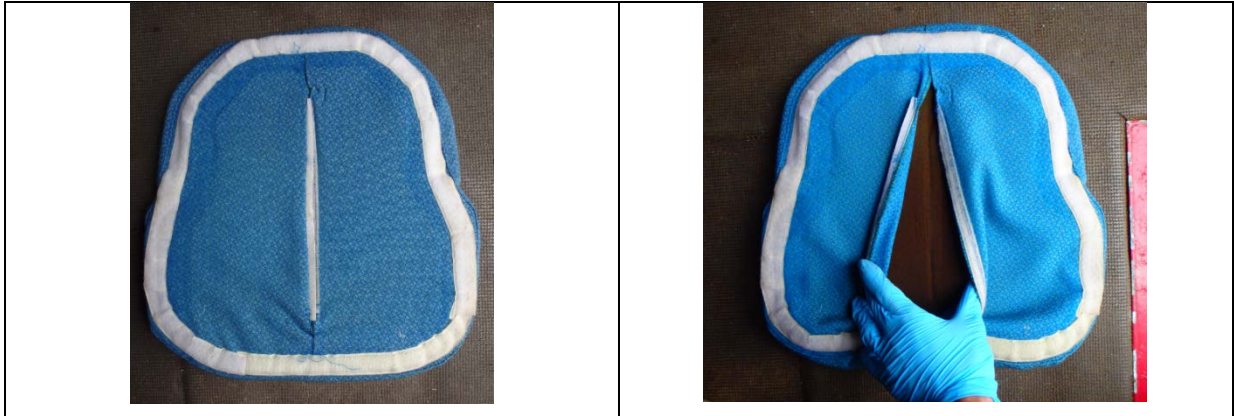
Par ailleurs, le traitement des sièges pilote et co-pilote devrait être confié à un ou une restauratrice spécialisée en textiles ou mobilier contemporains, puisqu'il en va directement de la matérialité et que les étapes de conservation des éléments d'origine (fils) et de réfection de la couture sont complexes. Les restauratrices du musée d'art décoratif de Paris, ont déjà procédé à ce type de traitement sur des sièges design contemporains, comportant également de la mousse PUR comme rembourrage⁹³. Il serait donc pertinent de faire appel à ce musée pour réaliser cette tâche.

⁹³ Gold, 2004, annexes p.27-29

Annexe 23 : Protocole de retrait des sièges Stewart et (co)pilotes

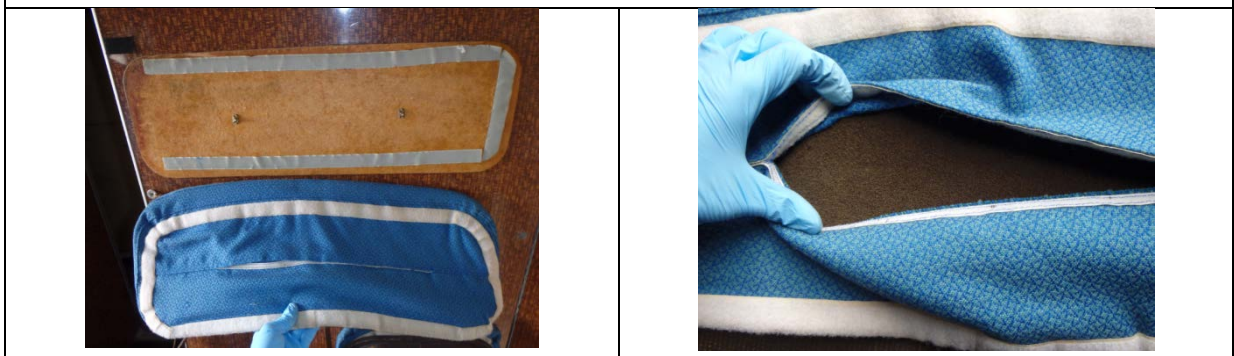
Tableau 16 Protocole de retrait des rembourrages des sièges Stewart et (co)pilotes

Protocole de retrait du rembourrage des sièges Stewart	
<p>Coussin d'assise : Les coussins sont maintenus sur la structure métallique des sièges grâce à un velcro placé tout le long de la bordure de leur face arrière. Sur cette même surface, une fente médiane, refermée par un velcro, permet d'accéder à la mousse de rembourrage.</p> <p>Coussin du dossier : Le coussin du dossier présente un assemblage similaire à celui des assises. Il est plaqué contre la paroi de la cabine grâce à un velcro placé tout le long de la bordure de sa face arrière et la présence d'une fente médiane refermée par un velcro permet également d'avoir accès à la mousse.</p>	
	
<p>1. Retirer le coussin d'assise du siège: tirer délicatement l'assise vers le haut pour la désassembler des velcros qui la maintiennent au reste du siège.</p>	
	
<p>2. Retirer la housse du rembourrage de l'assise : détacher le velcro central placé à l'arrière du coussin, puis retirer la housse contenue à l'intérieur.</p>	



Pour retirer la mousse du dossier, procéder de la même manière que pour l'assise...

3. Retirer le coussin du dossier de la paroi : tirer délicatement le coussin du dossier contre soi, pour la désassembler des velcros qui le maintiennent à la paroi de la cabine.



4. Retirer la housse du rembourrage du dossier : détacher le velcro central placé à l'arrière du coussin, puis retirer la housse contenue à l'intérieur.



Les coussins du tabouret sont également conçus pour être démontable et avoir accès à la mousse de rembourrage facilement. Par ailleurs, l'assemblage du coussin d'assise présente, en plus d'un dispositif de velcros, quelques boutons qui le relie à la structure métallique du tabouret.

Protocole de retrait du rembourrage du tabouret (cabine de pilotage)

Coussin d'assise : le coussin s'insère sur le dessus de la structure métallique. Quatre languettes cousues sur les côtés de la housse viennent se boutonner à cette dernière, permettant ainsi de maintenir le coussin en place. Une ouverture traversant tout le dessous du coussin et refermée par un velcro permet de accéder à la mousse.

Coussin du dossier : il est assemblé de la même manière que le coussin du dossier des sièges Stewart. Le coussin est plaqué contre la paroi de la cabine pilote grâce à un velcro placé tout le long de la bordure de sa face arrière et la présence d'une ouverture médiane refermée par un velcro permet également d'avoir accès à la mousse.



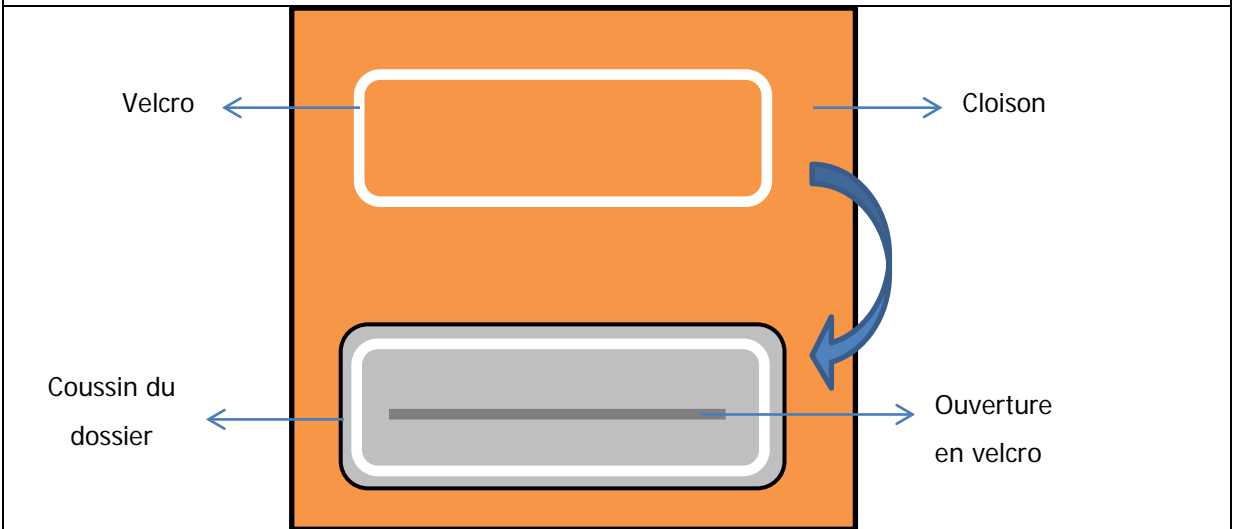
1. Retirer le coussin d'assise du siège : déboutonner les quatre languettes qui maintiennent le coussin à sa base métallique.



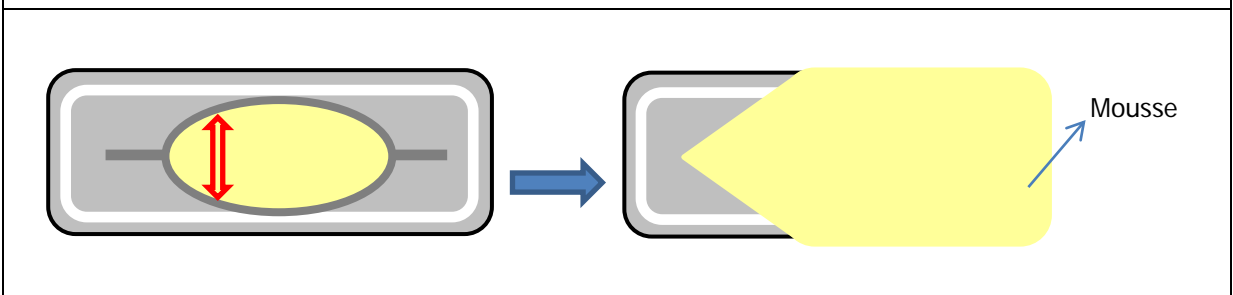
2. Retirer la housse du rembourrage de l'assise : détacher le velcro de l'ouverture présente sur le dessous du coussin, puis retirer la mousse contenue à l'intérieur.



3. Retirer le coussin du dossier de la paroi : tirer délicatement le coussin du dossier contre soi, pour le désassembler des velcros qui le maintiennent à la paroi (*suivre la même procédure que pour les sièges Stewart*).



4. Retirer la housse du rembourrage du coussin du dossier: détacher le velcro de l'ouverture présente sur le dessous du coussin, puis retirer la housse contenue à l'intérieur.



Sièges pilotes et co-pilotes

Comme dit précédemment, le système d'assemblage des sièges pilote et copilote est plus complexe que pour les précédents. De plus, l'accès à la mousse ne peut se faire directement et nécessite de procéder au retrait d'une des coutures des housses. Pour cette étape et celle du remontage de la housse (après remplacement ou autre traitement de la mousse) l'appui d'un restaurateur est recommandé.

Le retrait de la mousse de rembourrage se déroule donc en deux étapes : le désassemblage des coussins de l'assise et du dossier du reste du siège puis le retrait de la mousse des coussins.

Protocole de retrait du rembourrage des sièges pilotes et copilote

Assise : comme dans le cas des autres sièges, le coussin d'assise est indépendant de celui du dossier. A l'instar des coussins des sièges passagers, le rembourrage est recouvert par deux housses : une (n°1) l'enveloppant complètement et ne présentant aucune ouverture permettant d'accéder directement à la mousse, et une autre (N°2, housse directement visible) placée par-dessus avec des prolongements qui viennent se boutonner au-dessous de la structure métallique du siège, permettant ainsi de maintenir le coussin en place.

Dossier : le principe d'assemblage du coussin du dossier est similaire à celui de l'assise. Le rembourrage est entièrement enveloppé dans une première housse avec laquelle il forme le coussin d'assise (qui ne présente aucune ouverture) et une seconde qui le recouvre. Les côtés de cette dernière présentent également des prolongements qui viennent se boutonner à l'arrière du dossier.





1. Désassemblage des coussins: déboutonner les prolongements de la housse (N°2) maintenant les coussins en place puis retirer complètement cette dernière. Les coussins n'étant plus maintenus peuvent ainsi être enlevés du reste du siège.



2. Retrait du rembourrage des coussins : Les coussins ne présentant aucune ouverture permettant d'accéder à la mousse, il est nécessaire de défaire une des coutures⁹⁴. Pour cela plusieurs recommandations peuvent être suivies :

- Défaire la couture présente sur l'arrête du coussin la moins susceptible d'être visible par le visiteur (arrête de la partie inférieure du coussin, placé côté paroi de la cabine).
- Si possible ne défaire que le premier point de couture puis défaire progressivement le fil de la couture, de manière à récupérer ce dernier dans son entier en vue de le réutiliser pour la fermeture de la housse après son remplacement. Dans l'optique de conserver au maximum les matériaux d'origine dans leur disposition, l'attention portée à la récupération du fil est un paramètre important. Si ce dernier n'est malheureusement plus réutilisable il est important de le placer dans une pochette (avec descriptif adéquat) en vue de son archivage, et utiliser un fil de lin à la place.
- Pour recoudre la housse une fois le traitement terminé, il faut passer le fil (d'origine ou de lin) à travers les points de la couture d'origine, de manière à ne pas repiquer le tissu.
- Comme pour chaque opération menée sur l'objet, la traçabilité des informations est un aspect important d'autant plus lorsqu'on touche directement à la matérialité de l'objet. Il est donc essentiel de retranscrire l'ensemble des actions menées dans le dossier du traitement de l'objet.

Annexe 24 : Tableau récapitulatif des facteurs de dégradation et leurs effets sur la mousse PUR éther

Tableau 17 Récapitulatif des facteurs de dégradation

Facteur de dégradation	Effets sur la mousse PUR éther ⁹⁵
Lumière	Photoxydation , avec perte des propriétés mécaniques, apparition de réseaux de microfissures, décoloration. Réticulation , entraînant un durcissement du matériau. Elévation de la température interne , ce qui favorise l'accélération de l'ensemble des processus de dégradation
Oxygène	Un des deux acteurs (avec la lumière) de la dégradation photochimique ; Création de produits d'oxydation (formates et aldéhydes)
Eau-Humidité (+60% ou instable) ⁹⁶	Phénomène d'hydrolyse , avec perte de cohésion du matériau ; Favorise l'action des polluants atmosphériques et le développement de moisissures. Mouvements différentiels pouvant induire des fissures

⁹⁴ La housse de l'assise du siège co-pilote présente une importante déchirure laissant apparaître la mousse. Malgré cela, sa taille ne permet pas de retirer le rembourrage, la pression exercée par le passage du rembourrage risque fortement d'aggraver la déchirure.

⁹⁵ Les facteurs de dégradation de la mousse PUR éther et ester sont similaires, seule l'ampleur des effets peut varier.

Température (+25°C)	Accélère la vitesse des différents processus de dégradation : durcissement et assèchement, fendillement, fragilisation générale du matériau
Polluants	Attaque acide du matériau : transformation de la couleur, de la structure cellulaire et des propriétés mécaniques du matériau ; la poussière favorise les phénomènes d'hydrolyse et le développement biologique
Anthropique	Dégradation structurelles du matériau : abrasion, déformations, déchirures. Fatigue structurelle du matériau par sollicitation répétée du siège ; Dégagement de CO2 (dégradation chimique acide) de bactéries
Biologique	Micro-lacunes et déchets métaboliques (tâches à la surface du matériau ; dégradation chimique due aux fientes d'oiseaux). Dégradations mécaniques (abrasions et déchirures provoquées par des rongeurs ou autre mammifères de petites tailles)
Internes⁹⁷	Grande surface interne, particulièrement exposée aux phénomènes de photoxydation (lumière et oxygène). Adjuvants ajoutés dans la composition du matériau (ex : plastifiants, polyisocyanates) peuvent être à l'origine de dégradation intrinsèque (migration plastifiants, dégagement de COV).

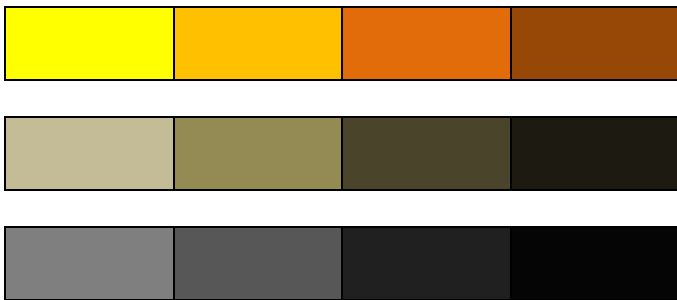
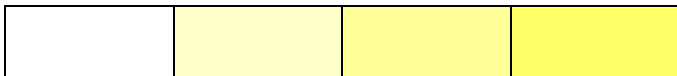
Annexe 25 : Fiche de suivi des échantillons

Tableau 18 Fiche de suivi des échantillons

Fiche de suivi des échantillons	
Nom : Prénom :	Date :
N°Identification :	Photographie :
Méthode de conservation	<input type="checkbox"/> Mise en anoxie <input type="checkbox"/> Surgélation <input type="checkbox"/> Boîte PP <input type="checkbox"/> Boîte Carton <input type="checkbox"/> Sachet <i>Minigrip</i> [®] <input type="checkbox"/> Sachet PE micro-perforé <input type="checkbox"/> Papier de soie <input type="checkbox"/> Blanc

⁹⁶ Une humidité basse (en dessous de 40%) peut également entrainer une fragilisation du matériau (comme tout matériau inorganiques, mais dans une moindre mesure comparé à une humidité supérieure à 60% ou instable (+/- 10% variations journalières).

⁹⁷ Pour proposer des méthodes de conservation à long terme de la mousse, il s'agira avant tout d'agir sur les facteurs de dégradation environnementaux, les facteurs internes n'étant pas contrôlables ou modifiables.

Appréciation visuelle, olfactive et au toucher		Points								
Couleur⁹⁸										
	Remarques :									
Couleur papier indicateur										
Dépôts blanc ou brillant en surface	<table border="1"> <tr> <td>Aucun</td> <td>Points brillant ou blanc isolés en surface⁹⁹</td> <td>Plusieurs points distincts brillants ou blanc/zones légèrement collante</td> <td>Zones de dépôts blanc en surface/ Surface collante</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> </table>	Aucun	Points brillant ou blanc isolés en surface ⁹⁹	Plusieurs points distincts brillants ou blanc/zones légèrement collante	Zones de dépôts blanc en surface/ Surface collante	1	2	3	4	
Aucun	Points brillant ou blanc isolés en surface ⁹⁹	Plusieurs points distincts brillants ou blanc/zones légèrement collante	Zones de dépôts blanc en surface/ Surface collante							
1	2	3	4							
	Remarques :									
Odeur	<table border="1"> <tr> <td>Pas d'odeur perceptible</td> <td>Odeur âcre perceptible sans gêne</td> <td>Odeur âcre provoquant un picotement des narines</td> <td>Fort odeur désagréable, provoquant réflexe de recul</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> </table>	Pas d'odeur perceptible	Odeur âcre perceptible sans gêne	Odeur âcre provoquant un picotement des narines	Fort odeur désagréable, provoquant réflexe de recul	1	2	3	4	
Pas d'odeur perceptible	Odeur âcre perceptible sans gêne	Odeur âcre provoquant un picotement des narines	Fort odeur désagréable, provoquant réflexe de recul							
1	2	3	4							
	Remarques :									
Toucher	<table border="1"> <tr> <td>Non poisseux, ne colle pas aux doigts</td> <td>Colle légèrement aux doigts</td> <td>Poisseux, certains fragments restent collés aux doigts</td> <td>Très poisseux, reste collé au doigt</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> </table>	Non poisseux, ne colle pas aux doigts	Colle légèrement aux doigts	Poisseux, certains fragments restent collés aux doigts	Très poisseux, reste collé au doigt	1	2	3	4	
Non poisseux, ne colle pas aux doigts	Colle légèrement aux doigts	Poisseux, certains fragments restent collés aux doigts	Très poisseux, reste collé au doigt							
1	2	3	4							

⁹⁸ Ajouter un point à chaque changement de niveau de couleurs (principe aussi valable pour le papier indicateur)⁹⁹ Ne dépassant pas 1mm de diamètre

	Doux (et souple) au toucher	Surface légèrement rugueuse*	Texture rigide au toucher mais pas cassante	Très dure/rigide, texture cassante et rugueuse	
	1	2	3	4	
	Remarques :				
Tests mécaniques					Points
Test ruban adhésif	Surface recouverte à moins de 10% de résidus	Surface recouverte jusqu'à 20% résidus	Surface recouverte jusqu'à 50% résidus	Surface recouverte à plus de 50% résidus	
	1	2	3	4	
	Remarques :				
Test abrasif (pinceau)	Ne provoque pas de poussière	Quelques poussières visibles	Provoque jet de poussière	Provoque nuage de poussière	
	1	2	3	4	
	Remarques :				
Test résilience	Reprend sa forme facilement	Reprend sa forme difficilement	Laisse marque, léger craquèlement	Craquèlement bien perceptible et se perce	
	1	2	3	4	
Autres observations					Points
Quantité de fragments dans le conditionnement	Aucun	Moins de 1cm ²	Moins de 2cm ²	Plus de 2 cm ²	
	1	2	3	4	
	Remarques :				
Masse/dimensions	Masse				
	Pas de perte observable		Perte observable (au-delà de 1 gramme ¹⁰⁰)		
	0		+1		
	Dimensions				
Pas de variation dimensionnelle		Variation dimensionnelle notable (au-delà de 1 mm)			
0		1			
	Remarques :				

¹⁰⁰ On tolère différence de +/- 1 gramme (marge d'erreur de la balance)

Etat du conditionnement	Aucune détérioration visible	Dégradation isolée	Plusieurs dégradations visibles sur l'objet/ Altération importante	Conditionnement très dégradé/ Atteinte structurelle importante
	1	2	3	4
Remarques :				
Total				
Commentaires	Sur le conditionnement : <i>Ageless Eyes</i> [®] ; gel de silice (indicateur coloré ; charbon actif,...) Autres :			

Principe du suivi

Chaque échantillon et son conditionnement spécifique feront l'objet d'un suivi sur le long terme. Pour ce faire la fiche établie ci-dessous permettra de suivre l'évolution de l'état de conservation tout au long de la période de tests des différentes méthodes de conservation. Pour ce faire, une série de critères descriptifs, aussi bien d'un point de vue des sens (olfactif, toucher) que de mini tests mécaniques accompagnés d'une échelle allant de 1-4 commentée permet de caractériser l'échantillon. Additionner les points correspondant le mieux à l'état de conservation de l'échantillon. Le total obtenu correspondra au degré d'altération de la mousse et pourra être mis en corrélation avec le total obtenu lors des autres observations et ainsi déceler toutes augmentations notables.

Pour commencer, effectuer une première observation de l'échantillon lors de sa mise en conditionnement qui servira de base de comparaison pour les observations futures. Utiliser toujours la dernière observation réalisée comme support comparatif.

Sélection des critères

Les critères de caractérisation de l'état de conservation de la mousse sont établis sur la base des dégradations dont la mousse peut faire l'objet (phénomène de dégradation chimico-physiques). Par ailleurs, certains visent également à suivre l'évolution du conditionnement lui-même, autrement dit si celui-ci est suffisamment résistant pour être utilisé sur le long terme.

Description des différents critères du suivi et conditions d'observations associées

Photographie

A effectuer selon les mêmes paramètres que l'appréciation visuelle (lampe allogène, ampoules 28 Watts, échantillon distancé de 50 cm de la source lumineuse). Chaque photographie doit être

accompagnée d'une charte colorimétrique, d'une échelle de grandeur et d'une étiquette permettant l'identification de l'échantillon (N°/Type de conditionnement/date). Les paramètres de l'appareil photographiques doivent également être définis dès le début du suivi et (ISO ; balance des blancs (mode halogène existe habituellement) ; mode de prise de vue ;...). Dans le cas présent, pour la première prise de vue des échantillons (lors de leur placement dans leur conditionnement spécifique) j'ai utilisé les paramètres suivants : ISO 400 ; balance des blancs automatique ; TV 1/60. Attention si possible à utiliser le même modèle d'appareil pour toute la durée du suivi.

Chaque fiche de suivi de l'échantillon doit être accompagnée d'une photographie de l'échantillon (voire plusieurs dans le cas de changements de surfaces notables).

Appréciations visuelles

Effectuer les appréciations visuelles (couleur de l'échantillon et du papier indicateur, déceler d'éventuels dépôts blancs/brillants pouvant être synonymes de migration de plastifiants/adjuvants) sous une lampe halogène (avec ampoules écologiques 28Watts), l'échantillon disposé 50 cm sous la source lumineuse. Le choix de cette dernière tient au fait qu'elle est un type de source lumineuse très répandue et abordable et permet une économie de 30% d'énergie par rapport aux ampoules à incandescence traditionnelles et une meilleure durée de vie (plus du double !). De plus, les ampoules à incandescence ou halogène traditionnelles sont progressivement retirées du marché depuis 2008.

Pour caractériser la couleur de l'échantillon, il faut se référer aux couleurs données par l'écran d'ordinateur avec des paramètres d'affichage ou de résolution d'écran préalablement définis (écran matte ; luminosité 80% ; ordinateur branché/sous- alimentation). De plus, les échelles colorimétriques présentes ci-dessus ont été conçues sur la base des couleurs Word, programme d'ordinateur le plus répandu et le plus accessible pour tous les utilisateurs et chaque couleur composant ces échelles sont caractérisées par un code couleur spécifique (ex : jaune niveau 1 → Palette de couleurs RVB/ Rouge 255/ Vert 255/ Bleu 0). Ceci permet d'uniformiser de manière précise les couleurs utilisées pour caractériser les échantillons et d'éviter d'avoir des dissemblances de couleurs dues à l'impression et pouvant fausser l'appréciation visuelle d'une fois à l'autre du suivi. Les chartes de couleurs proposées et les paramètres couleurs associés peuvent être modifiés ou complétés par le musée pour autant que le code couleur reste le même tout au long du suivi. Par ailleurs, l'utilisation d'une charte colorimétrique calibrée doit obligatoirement accompagner chacune des photographies prises de l'échantillon¹⁰¹.

¹⁰¹ L'utilisation uniquement d'une charte colorimétrique calibrée pour caractériser la couleur de l'échantillon n'est pas adéquate. En effet, après recherche aucune ne propose des nuances proches des couleurs que peut présenter la mousse PUR (si ce n'est dans le gris/noir) permettant de bien distinguer quelque changement de couleur superficielle de l'échantillon. Les chartes couleurs traditionnelles présentent des couleurs trop tranchées pour éventuellement percevoir un changement, d'où la nécessité de la compléter par une charte créée selon les besoins du musée, sur la base de paramètres bien précis et accessibles pour les collaborateurs.

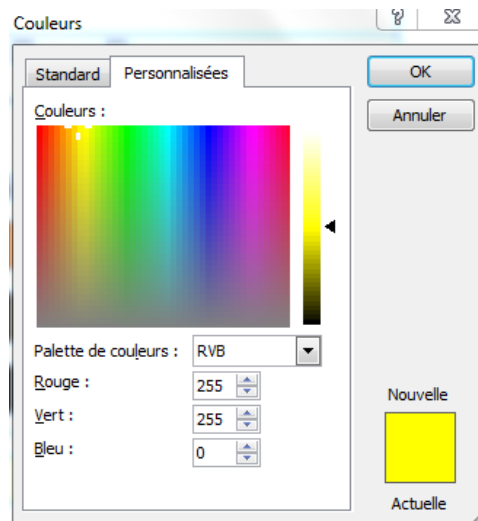


Figure 71 Chaque couleur est caractérisée par un code couleur spécifique, reste au musée de choisir l'échelle colorimétriques qu'il utilisera pour toute la durée du suivi.

Olfactif

La caractérisation de l'odeur de l'échantillon doit être effectuée à l'ouverture du conditionnement, c'est pour cette raison qu'elle s'inscrit comme un des premiers constats à effectuer. Lors de l'ouverture les gaz peuvent se dissiper rapidement, ne permettant plus de percevoir distinctement l'odeur caractéristique de l'échantillon (et éventuellement du conditionnement). Pour ce faire, placer le nez à une dizaine de centimètre du conditionnement lors de son ouverture/déballage.

Toucher

Pour que l'évaluation du « toucher » de la mousse soit la plus pertinente/perceptible il est nécessaire de l'effectuer sans le port de gants. Pour ne pas risquer d'altérer l'échantillon par apport d'éléments exogènes à sa surface, il faut veiller à bien se laver les mains avant (et après) le contact avec la mousse. Pour réaliser la première évaluation, plaquer la main sur la surface de la mousse (sans appliquer de pression particulière, juste suffisamment pour permettre le contact entre les doigts et l'échantillon) puis les retirer délicatement, et retranscrire si une sensation de collement est perceptible ou non (et à quel degré : 1-4). Pour la deuxième, qui consiste à évaluer la douceur ou rugosité de l'échantillon, il suffit de caresser doucement sa surface avec l'index dans un mouvement de balayage qui doit durer entre 2-3 secondes pour un échantillon de 100 cm².

Tests mécaniques

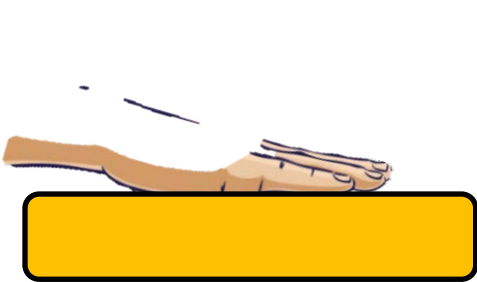
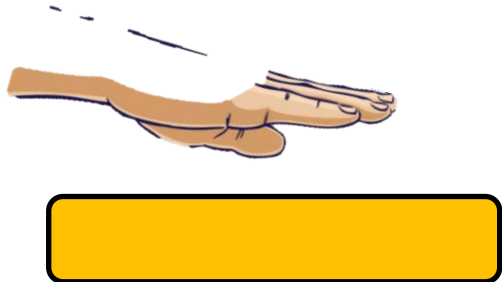
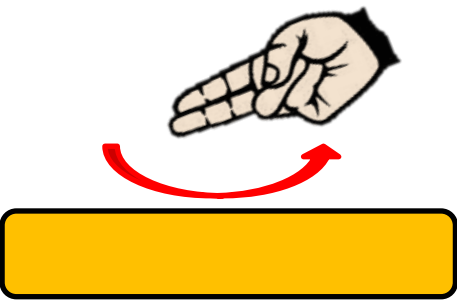
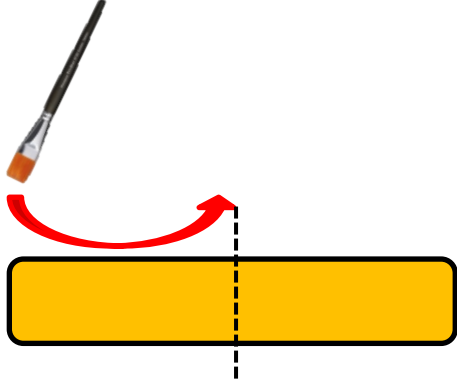
Une fois de plus, il est important de maintenir une certaine rigueur dans la réalisation des tests mécaniques de manière à rendre adéquate toute comparaison entre les différents constats d'état de

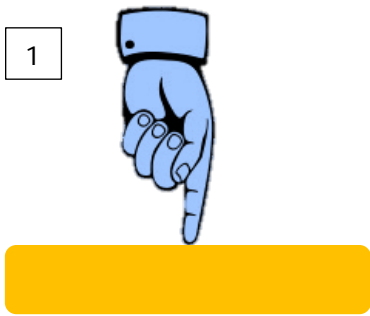
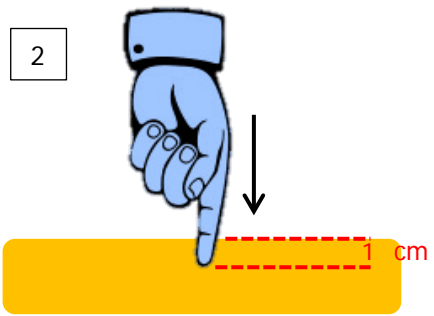
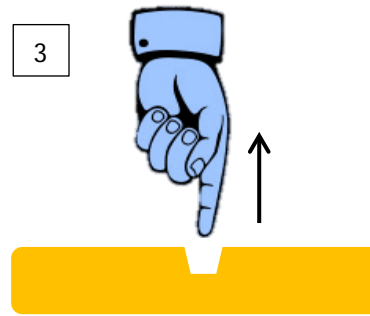



l'échantillon tout au long du suivi et de pouvoir en tirer des observations pertinentes. Concernant le test du ruban adhésif, utiliser un ruban de type Scotch Crystal transparent d'une longueur de 4 cm. Replier l'une des extrémités de ce dernier (sur environ 1/2 cm) de manière à faciliter son retrait. Placer le scotch à la surface de l'échantillon (pas directement au centre mais sur un des côtés), appliquer une légère pression dessus avec deux doigts, de façon à s'assurer de son adhérence à la mousse puis le retirer d'un coup sec (en veillant à maintenir l'échantillon avec l'autre main). Finir par évaluer la quantité de dépôts adhérents au ruban.

Pour le test « abrasif », utiliser un pinceau à poils mi-durs et effleurer la surface de l'échantillon (jusqu'à sa moitié) dans un geste de balayement rapide (moins d'1 seconde). Ce test devrait également être effectué sous lumière (halogène) de manière à bien déceler la quantité de particule dégagée.

Pour le test de résilience, équiper ses main d'un gant, puis effectuer une pression avec l'index (droit et tendu, perpendiculairement à l'échantillon) sur la mousse jusqu'à un enfoncement de deux centimètres avant de relâcher et d'observer comment cette dernière réagit à cette déformation.

Tableau 19 Tests de toucher et mécaniques à réaliser

Schémas des différents tests de toucher et mécaniques à réaliser	
Test de toucher 1	
	
Test de toucher 2	Test abrasif (au pinceau)
	

Test de résilience		
1	2	3
		
		
Reprend sa forme facilement	Laisse une marque	Se perce

Autres observations

Pour évaluer la quantité de fragments désolidarisés de l'échantillon, il faut prendre en compte les fragments contenus dans le conditionnement (par exemple au fond du sachet *Minigrip®* ou ceux tombés à proximité de la mousse dans le cas de la boîte en carton ou en PP) mais également ceux récoltés après avoir secoué très légèrement l'échantillon (en le maintenant à la verticale et en le secouant une fois très légèrement de haut en bas sur quelques centimètres).

Pour la pesée de l'échantillon, utiliser une balance de précision (au dixième de grammes¹⁰²), en veillant à mettre à zéro l'appareil avant d'effectuer la mesure. Il est possible de peser l'échantillon contenu dans une boîte en veillant à bien tarer cette dernière avant de peser.

Pour effectuer la mesure de l'échantillon, utiliser une règle en bois ou en plastique dure (éviter le métal car davantage de risque d'altéré l'échantillon lors de l'opération).

De manière générale, il est important lors de chaque test ou observation faite que l'échantillon soit placé sur une zone plane, propre et protégée par un intercalaire (ex : avec du papier de soie ou de la mousse PE 2mm) de manière à éviter au maximum toutes altérations.

Au niveau de l'état du conditionnement, veiller à déceler et prendre en compte toute altération d'ordre visuel (tâches, décoloration) et structurelle (perte cohésion, pliures, déformation, affaissement, abrasions, déchirures,...)

¹⁰² Certains modèles ne coûtent pas plus de 20 €

Remarques

La ligne présente en dessous de chacun des critères du constat d'état permet de préciser certains éléments ou nouvelles caractéristiques observés et qui ne sont pas explicités dans les différents degrés d'altération (1-4).

Commentaires :

La case finale commentaire, est prévue pour accueillir toute autres observation faite sur l'échantillon ou sur son conditionnement ne rentrant par dans un des critères précédents. Il s'agira par exemple pour la mise en anoxie, de décrire la couleur des *Ageless Eyes*[®] et déterminer si le traitement s'opère efficacement, de décrire la couleur des billes de gel de silice à indicateur coloré ou encore le comportement des pochettes contenant le charbon actif (poussière à proximité, taches,...).

Particularités

Pour la méthode de mise en anoxie il n'est pas possible d'effectuer le test olfactif. Par contre le toucher est faisable mais moins perceptible à cause du film *ESCAL*[®] recouvrant l'échantillon. Pour le poids il ne faudra pas prendre comme base l'échantillon mais bien le conditionnement tout entier...ou alors il faut peser l'échantillon de base et de manière séparée, le conditionnement, puis à chaque nouvelle pesée de l'ensemble du dispositif soustraire le poids du conditionnement.

Les tests mécaniques faisant intervenir le ruban adhésif et le pinceau ne sont pas réalisables mais le test de résilience est faisable malgré le parasitage dû à la présence du film *ESCAL*[®].

Mais d'autres mesures pertinentes peuvent être mises en avant comme évolution de l'absorption oxygène au sein conditionnement par l'intermédiaire des *Ageless Eyes*[®].



De plus, pour l'échantillon en surgélation il faut réduire au maximum le temps d'observation en dehors du surgélateur et l'observation sous lampe (ceci peut représenter une source de chaleur non-négligeable). Il est préférable d'effectuer le test en ouvrant uniquement la porte du surgélateur et en laissant l'échantillon au maximum à l'intérieur de ce dernier. Dans une optique idéale, il serait bien d'effectuer le constat d'état dans une chambre froide ou utiliser des pochettes de glace entourant l'échantillon (sans contact direct) pour maintenir une température aussi basse que possible durant tout l'examen.

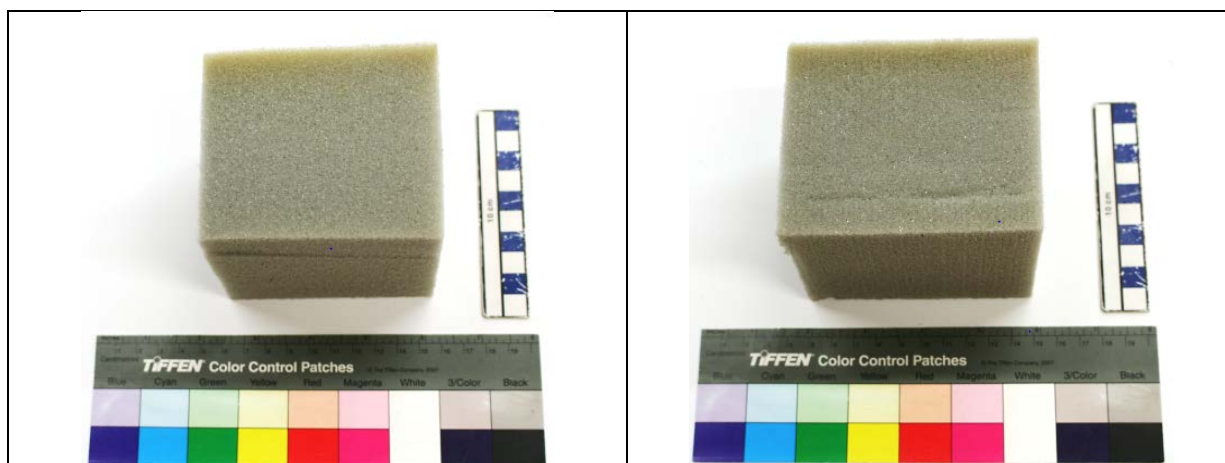
De manière générale, pour identifier tous nouveaux changements perceptibles sur l'échantillon, il est important de se référer au dernier constat d'état réalisé.

Annexe 26 : Présentation de la mousse « testée » et propositions de protocoles de prélèvements

Comme aucun échantillon test n'a pu être prélevé en vue des méthodes de conservation, je me suis rabattu sur de la mousse PUR provenant d'un autre objet. J'ai ainsi pu prélever des échantillons de la taille désirée, sur un matelas provenant d'un lit pliant, daté (selon la notice d'utilisation encore présente) de 1994. Ce qui est pertinent avec cette mousse c'est qu'elle partage plusieurs similitudes avec la mousse des rembourrages des sièges d'avion, à savoir : qu'elle est âgée de plus de 20 ans, qu'elle présente une odeur similaire (forte odeur âcre), qu'elle ait été contenue durant toutes ces années dans une housse textile et fût sollicitée à de nombreuses reprises. De plus, sa couleur se rapproche des mousses de type A1 et H, retrouvées sur les sièges de la Caravelle.

Tableau 20 Identification de la mousse testée

Identification	
<i>Désignation objet contenant la mousse</i>	Lit pliant à matelas épais
<i>Dimensions</i>	180x80x8 cm
<i>Date</i>	1994
<i>Provenance</i>	Déchèterie communale de Vicques (JU)
<i>Caractéristiques</i>	Mousse de couleur grise (légèrement verte), homogène sur toute la surface; souple (reprend sa forme assez rapidement); marque sous l'ongle; forte odeur âcre dégagée (très similaire à celle provenant de la cabine de l'avion).
<i>Constat d'état</i>	Zones abrasées en certains endroits; dépôts exogènes en surface (poils d'animaux); forte odeur âcre dégagée (très similaire à celle ressentie dans la cabine de l'avion).
Photographies	
	



Proposition de protocole de prélèvements pour la mise en conservation à long terme

Pour définir sur le long terme laquelle des méthodes de conservation proposées est la plus efficace et abordable, je recommande au musée de tester en temps réel, chacune d'elles avec des échantillons provenant directement des sièges de l'avion. Cependant comme la prise d'échantillons n'est à l'heure actuelle, pas encore acceptée par le musée, j'ai décidé néanmoins de décrire la manière dont celle-ci pourrait être effectuée le moment opportun. Le prélèvement peut être abordé de deux manières. Soit en prélevant à même la mousse de rembourrage, plusieurs échantillons de petite taille (surface d'environ 10x10 avec une épaisseur correspondant à celle de l'assise ou du dossier), soit en conservant plusieurs assises et dossiers dans leur intégralité. Les deux manières présentent des avantages et des désavantages. Cependant pour comparer l'efficacité des méthodes utilisées, il est essentiel que les échantillons récoltés soient les plus semblables possible, au risque que les observations ne soient pas pertinentes.

Pouvoir disposer d'échantillons provenant du même siège et présentant un état de conservation similaire est donc essentiel, il en est de même pour comparer l'évolution des échantillons en fonction ~~seulement~~ de leur conditionnement et non modifiés par des altérations initiales de la mousse. De plus, M. Christian Binet¹⁰³ m'a indiqué qu'il serait judicieux de réaliser deux types d'échantillonnage. Le premier sur une mousse peu dégradée et l'autre sur une mousse davantage détériorée. Ceci permettrait de prendre en compte les émissions de produits volatils résultant de la dégradation de la mousse piégée par le conditionnement.

1^{ère} méthode

Je préconiserais donc, pour chacune des méthodes de conservation à tester de prélever un échantillon sur l'assise et le dossier d'un siège. On pourrait ainsi comparer non seulement si la mousse du dossier

¹⁰³ Binet, 2015, *échange courriel*

et celle de l'assise d'un même siège réagit de la même manière mais également comment la mousse dégradée réagit au conditionnement par rapport à la mousse moins détériorée.

Avantages
<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un volume de stockage moins important que pour la méthode 2 - Permet de faire davantage de comparaisons
Désavantages
<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas une conservation des parties (dossier, assise) dans leur intégrité physique (formes,...). Caractère davantage invasif de l'opération¹⁰⁴. - Echantillonnage plus complexe que méthode 2 (nécessite d'échantillonner dans des zones où les divers types de mousse et état sont représentés). - Dans le cas où les tests se porteraient sur des échantillons de mousse provenant de sièges Stewart ou pilote, cette méthode d'échantillonnage pourrait se révéler davantage radicale et irrévocable, puisque peu d'exemplaires de ce type de sièges existent (en comparaison avec les sièges passagers).

2^{ème} méthode

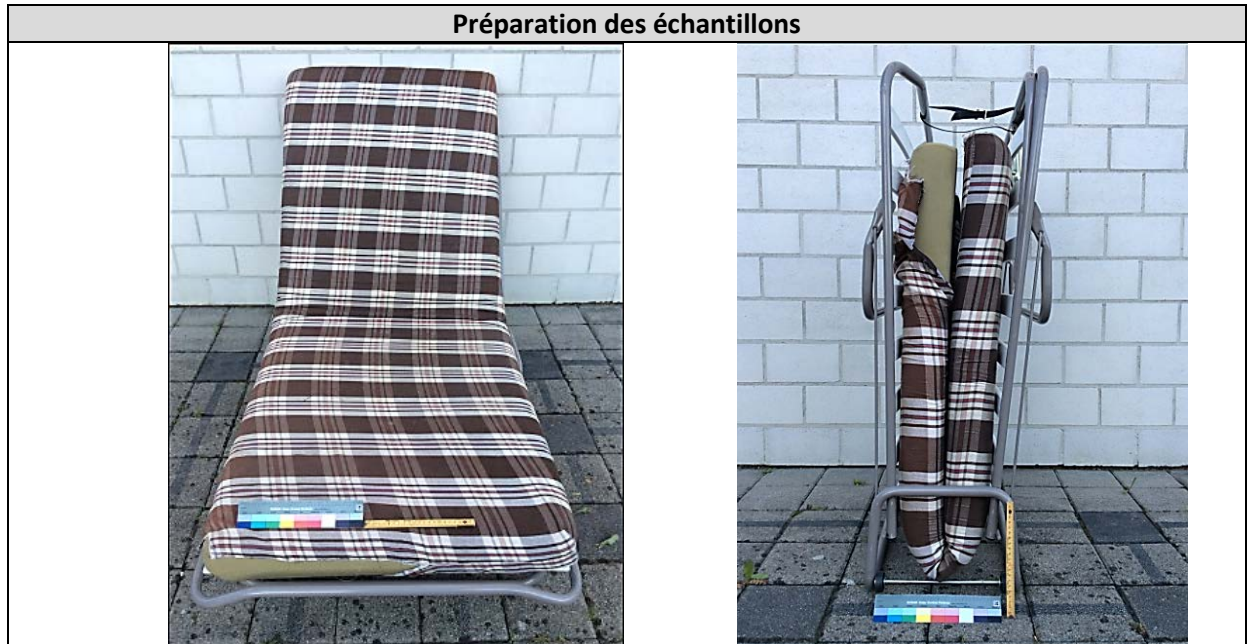
Elle consisterait à conserver non plus des échantillons de taille réduite représentatifs du rembourrage mais bien des dossiers et d'assises de sièges dans leur intégralité. Il s'agirait donc de retirer ces différentes parties et de les conserver telles quelles selon les différentes méthodes proposées.

Avantages
<ul style="list-style-type: none"> - Permet de conserver toute l'information liée à la structure, répartition et composition de la mousse d'origine (permettrait en tout temps la reconstitution d'un siège).
Désavantages
<ul style="list-style-type: none"> - Nécessiterait un volume de stockage bien plus conséquent pour un même nombre de méthodes testées. - Nécessiterait davantage de matériel/équipement de stockage. - Les échantillons de mousse testés ne proviendraient pas du même siège, ce qui peut avoir son influence quant aux observations et comparaisons à faire.

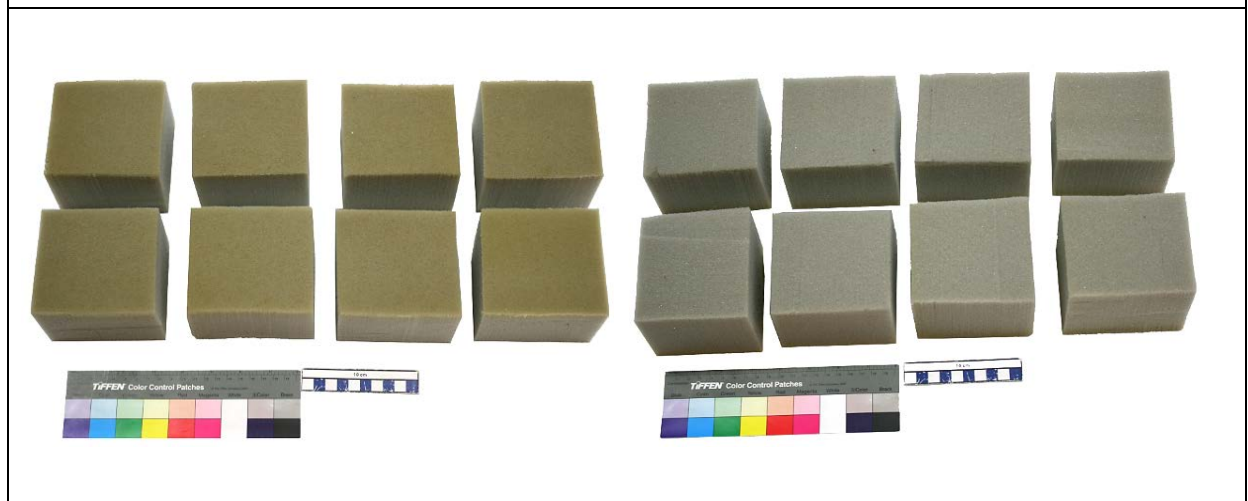
¹⁰⁴ Le grand nombre de sièges passagers disposés dans la cabine (plus de 130), l'état de conservation parfois très dégradé de la mousse et le fait de savoir qu'elle sera certainement amenée à être remplacée par un autre matériau de rembourrage, atténue le côté destructeur de cette méthode d'échantillonnage.

Annexe 27 : procédure de mise en œuvre des méthodes de conservation

Tableau 21 Préparation des échantillons


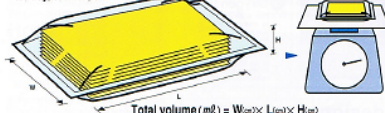
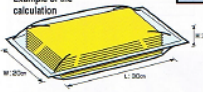

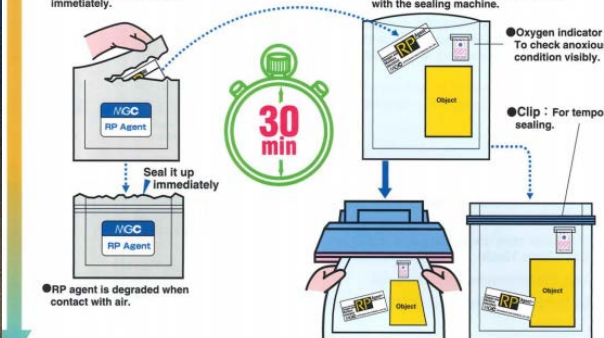


Photographies du lit pliable et de son matelas, d'où proviennent les échantillons



Après avoir retiré la mousse de sa housse, procéder au découpage des échantillons au cutter ou à la scie (permet une coupe plus régulière). La découpe s'effectue à l'aide de gants et d'un masque de protection. Il est également important de passer à l'aspirateur la zone de travail une fois ce dernier terminé, en raisons des nombreuses poussières engendrées par l'activité.

Tableau 22 Méthode 1

Méthode 1 : mise en anoxie							
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>2 Estimation of the air volume Estimate the air volume inside the package using the following expression:</p> $\text{Air volume (ml)} = \frac{\text{Total volume(ml)} \times \text{Weight (g)}}{\text{Specific gravity of the content}}$ <ul style="list-style-type: none"> For generally square-shaped objects, measure the sides with a ruler, etc. to calculate the total volume. For the specific gravity of the content, estimate an average specific gravity including the tray, cushion, etc.  <p style="text-align: center;">$\text{Total volume (ml)} = W(m) \times L(m) \times H(m)$</p> </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>© Mitsubishi</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 45%;"> <p>3 Selection of the RP agent Based on the estimated air volume, determine the size of the RP agent and the quantity.</p> <p>Example of the calculation</p>  </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>Corresponding air volume</p> <table border="1" style="font-size: small;"> <tr> <td>RP-1A:100ml</td> <td>RP-3A</td> <td>RP-3AH:300ml</td> </tr> <tr> <td>RP-5A:500ml</td> <td>RP-20A:2000ml</td> <td></td> </tr> </table> <p>Total weight: 1200g Specific gravity: 4 $W \times L \times H = 20 \times 30 \times 2 = 1200 \text{ ml}$ Air volume inside the package = $1200 - \frac{1200}{4} = 900 \text{ ml}$</p> <p style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 2px;">Use 2 packs of RP-5A</p> </div> </div>	RP-1A:100ml	RP-3A	RP-3AH:300ml	RP-5A:500ml	RP-20A:2000ml	
RP-1A:100ml	RP-3A	RP-3AH:300ml					
RP-5A:500ml	RP-20A:2000ml						
<p>Matériel nécessaire: Sachet <i>RP-20K</i>[®], <i>Ageless Eyes</i>[®], pochette <i>ESCAL</i>[®], indicateur polluant papier, clip PP, boîte pp transparente</p>	<p>Procéder au calcul des doses adéquates, en suivant les indications du fabricant Mitsubishi[®]</p>						
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>4 Enclosing / Heat Seal</p> <ul style="list-style-type: none"> Take out the necessary amount of RP agent, and then reseal immediately. Seal it up immediately RP agent is degraded when contact with air. </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p>© Mitsubishi</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;">  <div style="text-align: right;"> <ul style="list-style-type: none"> Enclose the object and the RP agent into the high gas-barrier bag and seal it up with the sealing machine. Oxygen indicator: To check anoxic condition visibly. Clip: For temporarily sealing. </div> </div>						
<p>Préparer les clips PP et rassembler tout le matériel/produits nécessaires puis les insérer rapidement dans la pochette¹⁰⁵, en veillant à répartir de manière équitable les sachets <i>RP-20K</i>[®] (un placé de chaque côté). On peut également procéder à la fermeture du sachet par thermosoudure (double), mais dans la situation où le musée ne dispose pas de thermosoudeuse, l'utilisation de clips est indiqué (de plus cela facilite également la mise en œuvre).</p>							

¹⁰⁵ Maximum 30 minutes entre l'ouverture de la pochette contenant les sachets *RP-20K*[®] et la fermeture définitive de la pochette *ESCAL*[®].



Après avoir réalisé un vide partiel (80%), refermer la pochette à l'aide d'un clip PP. L'action d'insertion des produits et de fermeture de la pochette doit se faire dans un laps de temps le plus court possible, de manière à ne pas influencer l'efficacité des différents produits.

Résultat final : la pochette et sa face transparente permettant la visibilité de l'échantillon et des différents indicateurs qualitatifs (indicateur polluant papier, *Ageless Eyes*[®]).

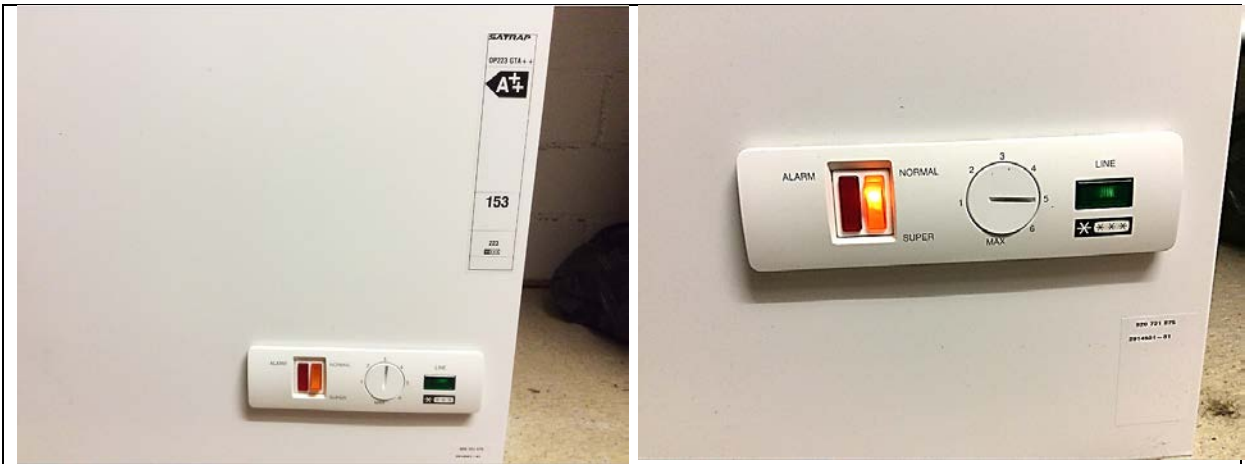
Avantages	Désavantages
<p>Méthode potentiellement très performante pour garantir l'intégrité des mousses sur le long terme, d'une part parce que c'est la seule qui est relatée spécifiquement pour la mousse de PUR mais également parce qu'elle agit sur tous ses principaux facteurs de dégradations environnementaux : O₂, UV et polluants.</p>	<p>Méthode la plus coûteuse et la plus complexe à réaliser Une fois ouvert, le système n'est plus efficace, à moins que l'opération se fasse sous atmosphère saturée en azote.</p>
Précautions	
<p>1. Le phénomène de captation de l'oxygène par les pochettes produit une réaction exothermique locale, ces dernières ne doivent donc pas être mises en contact direct avec l'échantillon¹⁰⁶.</p> <p>2. Lorsque les absorbeurs d'oxygène ont épuisé complètement l'oxygène présent dans la pochette, le volume total de cette dernière aura été réduit de 20%, d'où la nécessité de ne pas procéder à un vide complet de la pochette lors de sa création mais bien à 80% (correspond à une pochette légèrement bombée), ce qui évitera un écrasement de l'échantillon par pression du vide formé¹⁰⁷.</p>	

¹⁰⁶ Conservation Support System, 2013 [en ligne]

¹⁰⁷ Conservation Support System, 2013 [en ligne]

Tableau 23 Méthode 2

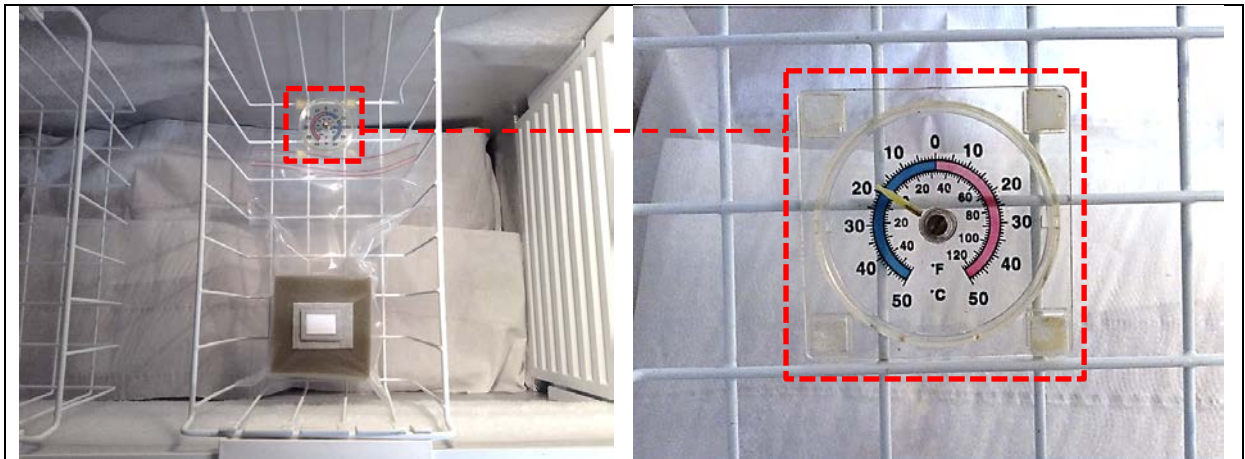
Méthode 2 : surgélation	
	
<p>Matériel nécessaire : sachet <i>Minigrip</i>[®] ; indicateur de polluants ; papier de soie ; gants. De plus il faut considérer l'acquisition d'un surgélateur et d'un thermomètre.</p>	<p>Placer l'échantillon dans un sachet <i>Minigrip</i>[®] avec l'indicateur papier (en veillant à intercaler un rectangle en papier de soie).</p>
	
<p>Effectuer un vide partiel à l'intérieur du sachet en veillant à ne pas induire une compression des bords de l'échantillon.</p>	<p>Le congélateur</p>



Le surgélateur/congélateur doit être pré-réfroidi à la température désirée (-20°C) avant l'introduction de l'échantillon. Pour ce faire se référer au mode d'emploi de l'appareil qui mentionne quels réglages effectuer pour atteindre le pallier désiré (refroidissement 1-6 ; rapidité normale ou super). Contrôler également soi-même ce paramètre à l'aide d'un thermomètre.



L'intérieur de l'appareil comporte le plus souvent un compartiment principal et un plus petit. Des paniers sont également présents et permettent de contenir des petits volumes pour éviter l'écrasement par l'entassement des aliments plus lourds dans le fond de l'appareil, mais également pour éviter que l'aliment soit en contact avec les parois de l'appareil qui présentent le plus souvent des cristaux de glaces. J'ai donc utilisé un de ces paniers comme support de l'échantillon, puisqu'il permet d'isoler ce dernier des autres possibles substances à proximité mais également pour des questions de manutention (permet de sortir l'échantillon sans avoir à saisir directement le sachet).



Résultat final : l'échantillon et l'indicateur papier sont contenus dans un sachet *Minigrip®* où le vide a été fait (à environ 90%), tenu sur un panier. Un thermomètre est également présent à proximité du sachet, permettant de vérifier, à tout moment, la température à l'intérieur de l'appareil.

Avantage	Désavantage
- Inhibition efficace des processus de dégradation chimique	- L'échantillon gelé se durcit, ce qui peut le fragiliser et provoquer de potentielles dégradations mécaniques (risques de fissures et de désolidarisation lors de manipulations plus importantes)

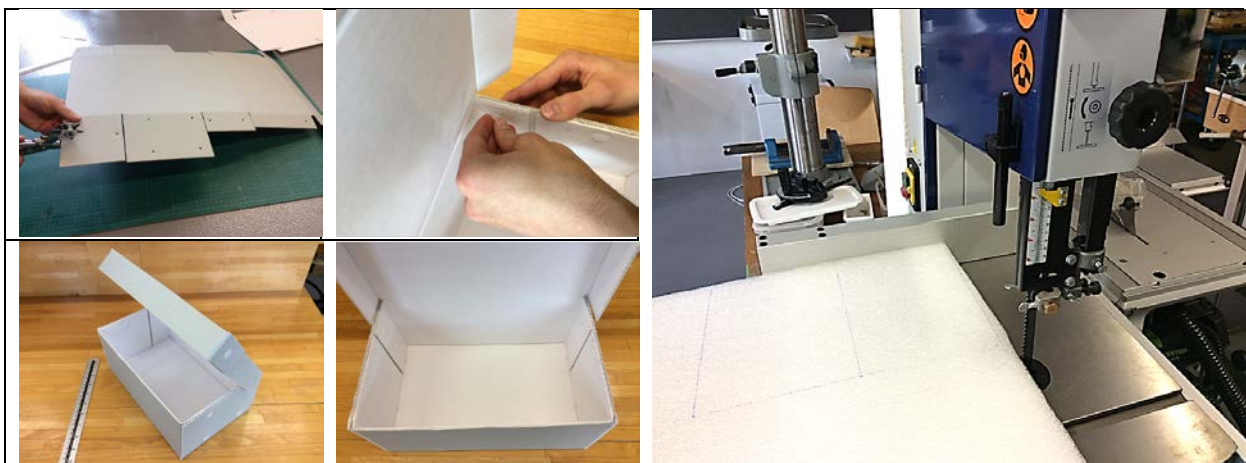
Précautions

Veiller à ce que le vide partiel effectué ne soit pas excessif et n'engendre pas l'écrasement des parois de la mousse.
 Changer le sachet en cas de percement ou de dysfonctionnement de son système de fermeture.

Tableau 24 Méthode 3

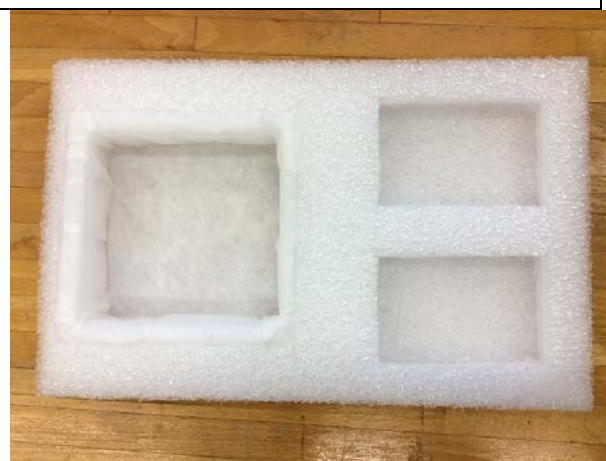
Méthode 3 : boîte en carton et produits sorbants	
	
<p>Matériel nécessaire : carton « conservation » ; rivets PP, Prosorb® (ou gel de silice) pré-conditionné à 50% ; charbon actif ; emporte-pièce ; cutter règle et équerre ; indicateur papier de polluants ; Mousse PE 5 cm d'épaisseur ; non-tissé de polyester ; micro-perforé de PE ; plioir ; boîte PS ; crayon de papier</p>	
	
<p>La première étape consiste en la création de la boîte en carton, suivant le modèle « boîte à chaussures » ou en une seule pièce (modèle choisi dans la situation présente¹⁰⁸). Après avoir défini les dimensions adéquates pour la réalisation de la boîte (à l'aide d'un schéma), reporter le patron en dimensions réelles sur le carton.</p>	<p>Procéder ensuite à la découpe au cutter du patron et plier les différentes parties (celles apparaissant en traitillé) à l'aide du plioir.</p>

¹⁰⁸ Voir le plan de réalisation de la boîte (fig. 74, p. 93).



Assembler maintenant les différentes parties du d'un patron à l'aide de rivets en PP. Percer au préalable les emplacements des rivets à l'aide de l'emporte-pièce. Après avoir placé les rivets, découper les extrémités excédentaires.

Une fois la boîte créée, procéder à la réalisation du conditionnement interne en mousse PE 5 cm d'épaisseur. Pour cela découper dans un premier temps la plaque de mousse selon les dimensions internes de la boîte (au cutter ou à la scie).



Creuser ensuite les différents compartiments prévus pour accueillir l'échantillon de mousse PU, le charbon actif, le ProSORB et l'indicateur papier de polluant.

Après avoir lissé les bordures du support en mousse au pistolet à air chaud, matelasser ensuite le compartiment de l'échantillon avec du non-tissé de polyester¹⁰⁹, ceci pour éviter tous risques d'abrasions.

¹⁰⁹ De la mousse PE 2mm ou encore du papier de soie peut également être utilisé.

	
<p>Insérer ensuite les boîtiers PS dans leur emplacement respectif. Une seule boîte suffit pour réaliser les deux compartiments, en utilisant le couvercle et la base de cette dernière.</p>	<p>Après avoir inséré les différents produits, préalablement pesés selon les doses prescrites, recouvrir les boîtiers avec le textile adéquat (Non-tissé de polyester¹¹⁰ pour le boîtier contenant le charbon actif et micro-perforé de PE pour celui du gel de silice), permettant les échanges de vapeur d'eau¹¹¹.</p>
	
<p>Résultat final.</p>	

¹¹⁰ L'intissé de polyester a été préféré au micro-perforé de PE, puisque ce dernier, après test, retenait plus efficacement les poussières émises par le charbon actif.

¹¹¹ Cette constitution s'inspire de caissettes vendues prêtes à l'emploi par les fournisseurs pour des espaces de plus grands volumes telles des vitrines (1m³). Ce dispositif, à l'inverse de pochette entièrement thermo-soudées ou cousues à l'avantage d'être réutilisable et facilite le changement ou le reconditionnement des produits.

Avantages	Désavantages
<ul style="list-style-type: none"> - Conditionnement agissant sur les dégradations dues à une « hygrométrie instable ou inadéquate » ; l'action corrosive des polluants et l'action directe de la lumière sur la mousse. - En plus du dessiccateur, le carton lui-même participe à la régulation de l'hygrométrie à l'intérieur du conditionnement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite de fabriquer la boîte (40 min.) - Nécessite l'ouverture du conditionnement pour visualiser directement l'échantillon
Précautions	
<p>Les poussières de gel de silice sont dommageables pour les voies respiratoires, ce qui nécessite d'utiliser des gants et un masque de protection lors de sa préparation.</p> <p>Il est important de procéder à des contrôles fréquents du taux d'humidité relatif à l'intérieur du conditionnement, de manière à pouvoir évaluer l'efficacité du produit et si nécessaire le remplacer ou le reconditionner.</p> <p>Eviter de contaminer le gel le mettant en contact avec des surfaces non propres ou en le manipulant à mains nues.</p> <p>Pour tirer profit de toute l'efficacité du produit, le compartiment accueillant ce dernier doit être peu profond (2cm) de manière à offrir la plus grande surface possible en contact avec l'air¹¹²</p> <p>Les doses prescrites pour le Prosorb, gel de silice et le charbon actif sont valables pour une année. Après échéance, il est indispensable de procéder au changement ou au reconditionnement du produit pour continuer à garantir l'efficacité du système.</p>	
Principaux avantages et inconvénients du carton ondulé de qualité conservation ¹¹³	
<p>Avantages</p>	<p>→ Ce type de carton assure une bonne protection contre les chocs thermohygrométriques et mécaniques, contre la poussière, la lumière (UV et IR) et les insectes rampants, ralentissant ainsi le processus de dégradation des matériaux. Il est facile de s'en procurer, reste économique à l'achat et se façonne assez facilement. Il se trouve être également recyclable et biodégradable.</p> <p>→ La grande stabilité chimique dont jouit le carton ondulé de qualité « conservation » fait qu'il est aussi compatible avec un grand nombre de familles d'objets, dont les polymères de synthèses. Du fait de son pH neutre, il n'est pas une source d'acidité aux pouvoirs dégradants pour les objets qu'il conserve. Bien qu'en vieillissant il s'acidifie inévitablement, cela reste très négligeable comparé aux dégagements acides pouvant être émis par l'échantillon lui-même.</p>

¹¹² b.Tétreault, 2003, ch. gel de silice.

¹¹³ Tableau réalisé sur la base des documents suivants : a.Préserv'Art, 2010 [en ligne], Préserv'Art, 2011 [en ligne] et Garcia Gomes, 2011, p.84

Inconvénients	<p>→ Bien que traité chimiquement, le carton reste un matériau organique sensible, dans une moindre mesure, aux agents atmosphériques tels que l'humidité relative, la température, les polluants, la lumière et les micro-organismes.</p> <p>→ C'est un matériau inflammable, fragile à la pliure (risque élevé de déchirure en cas de manipulations excessives)¹¹⁴ et sa perméabilité à l'eau grandit avec le temps. Enfin, ce carton se trouve être inadéquat pour le conditionnement d'objets de grandes dimensions.</p>
----------------------	---

Plan de réalisation de la boîte en carton

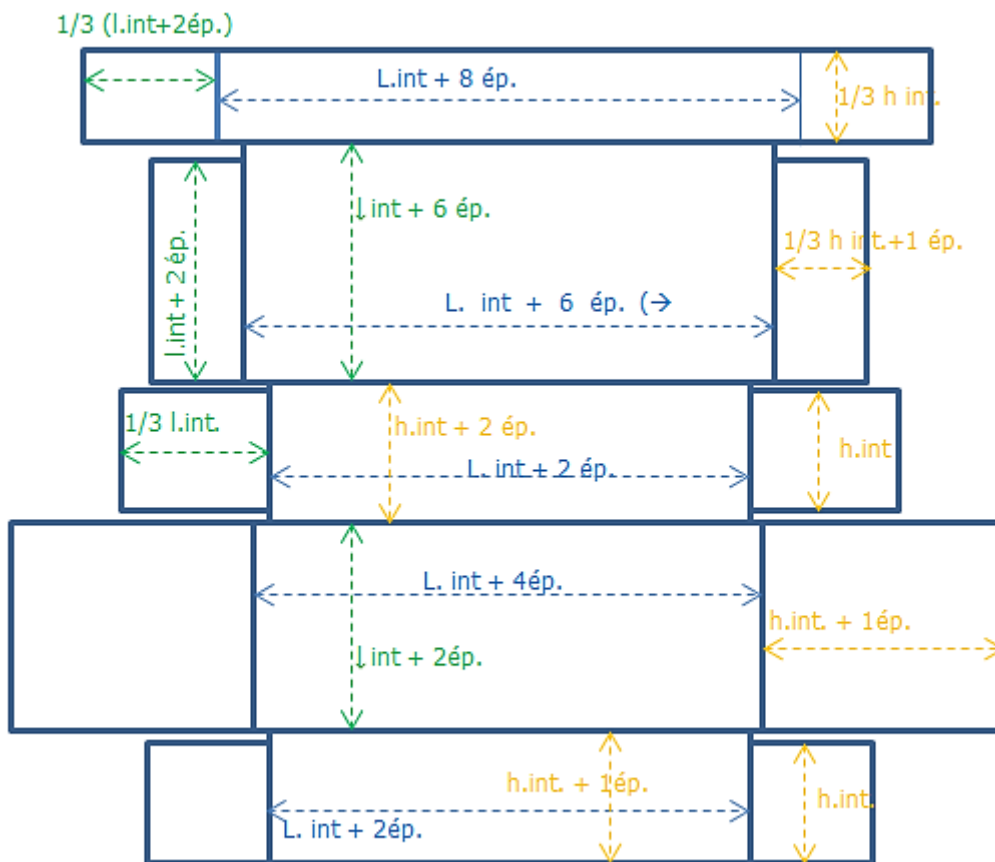


Figure 72 Boîte en une seule pièce, à rabats intérieurs pour la partie inférieure et rabats extérieurs pour le couvercle. Schéma non à l'échelle.

L. = Longueur

l. = largeur

h. = hauteur

Ep. : épaisseur (0.3 cm)

● Rivets PP

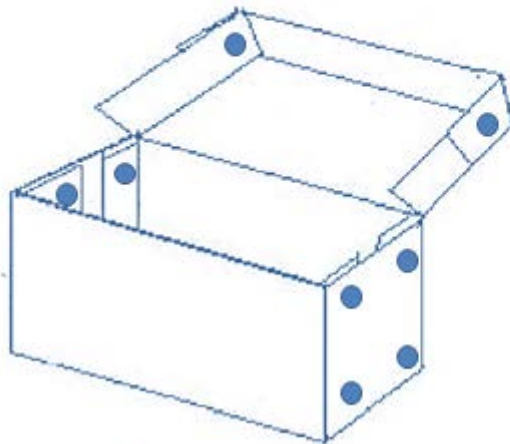


Tableau 25 Méthode 4

Méthode 4 : boîte PP et produits sorbant



Matériel nécessaire : boîte Rako, Prosorb (ou gel de silice) pré-conditionné à 50% ; charbon actif ; emporte-pièce ; cutter règle et équerre ; indicateur papier de polluants ; mousse PE 5 cm épaisseur ; non-tissé de polyester ; crayon de papier ; plioir



Réaliser le conditionnement interne de la boîte, en suivant la même procédure que pour la boîte en carton.



Résultat final

Avantages	Désavantages
- La boîte est directement prête à l'usage (gain de temps non négligeable).	- La boîte en PP ne participe pas directement à la régulation de l'hygrométrie (à l'inverse du carton)
Précautions	
Similaire à méthode 3	

Tableau 26 Méthode 5

Méthode 5 : sachet <i>Minigrip</i>® avec écran en aluminium	
	
<p>Matériel nécessaire : rouleau film aluminium alimentaire ; sachet <i>Minigrip</i>® (ici 22x32 cm) ; papier de soie ; indicateur papier de polluants ; gants ; ciseau.</p>	<p>Placer l'échantillon dans un sachet <i>Minigrip</i>® avec l'indicateur papier (en veillant à intercaler un rectangle en papier de soie).</p>
	
<p>Effectuer un vide partiel à l'intérieur du sachet (envir.80) en veillant à ne pas induire une compression des bords de l'échantillon (pour limiter les risques de dommages mécaniques).</p>	<p>Découper une section du film alimentaire en aluminium (d'une longueur d'environ 60x30)</p>



Procéder à l'emballage de l'échantillon (contenu dans le *Minigrip*®) dans le film d'aluminium.

Rabattre les deux côtés du film



Rabattre les extrémités du film et vérifier que toute la surface de l'échantillon soit recouverte par le film

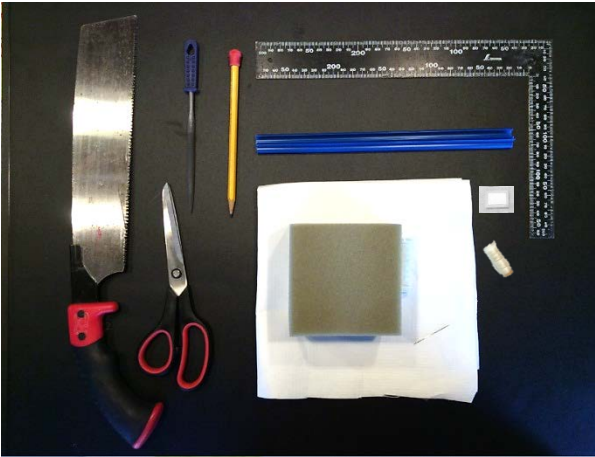
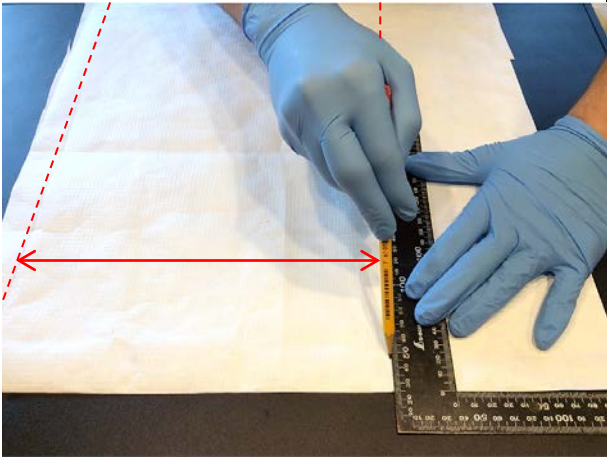
Une fois l'emballage en aluminium terminé, il ne reste plus qu'à placer le dispositif dans une seconde pochette *Minigrip*® (pour éviter toute altération du film)



Résultat final : l'échantillon est contenu dans un 1^{er} sachet *Minigrip*® emballé à l'aide d'un film d'aluminium, le tout placé dans une seconde pochette *Minigrip*®.

Avantages	Désavantages
<ul style="list-style-type: none"> - Simple à mettre en œuvre et très abordable d'un point de vue financier. - Système efficace pour protéger efficacement l'action dégradante de la lumière (UV et IR), des poussières ¹¹⁵et ralentir de manière générale les processus d'oxydation - Perméabilité des sachets aux gaz permettant aux COV issues de la dégradation de la mousse de s'échapper. 	<ul style="list-style-type: none"> - Echantillon non directement visible (nécessite de retirer en partie l'emballage en film d'aluminium). - Bien que l'aluminium soit considéré comme un alliage métallique stable le risque de corrosion reste présent - le système n'intègre pas de produits sorbants visant à réguler l'hygrométrie ou inhiber l'action corrosive des polluants
Précaution	
<p>Remplacer le film en aluminium en cas de déchirures ou de traces de corrosion</p> <p>Remplacement des sachets <i>Minigrip</i>® en cas d'oxydation visible (jaunissement, opacité du sachet) ou de déchirure.</p>	

Tableau 27 Méthode 6

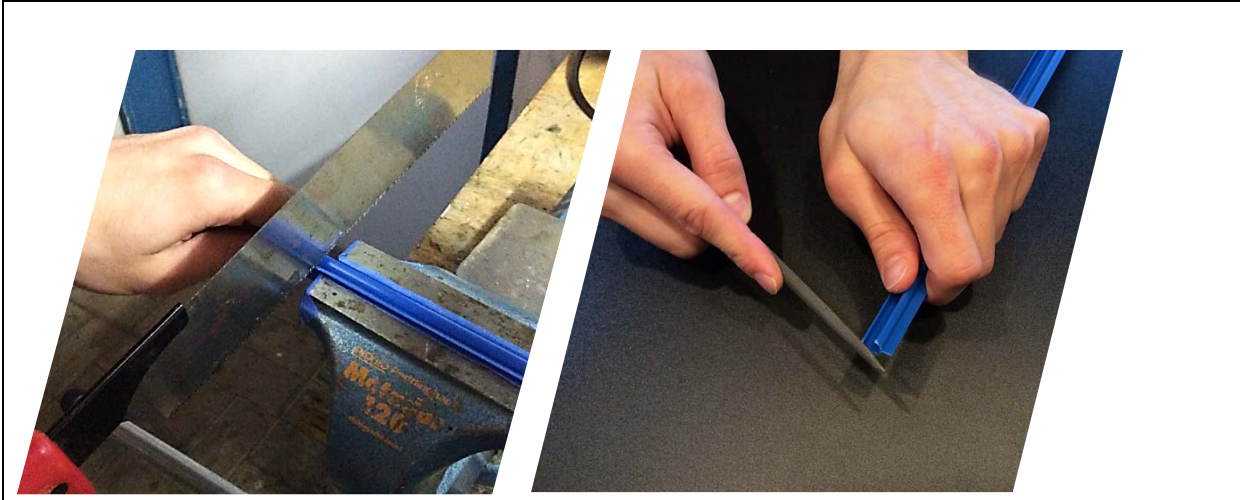
Méthode 6 : Pochette Tyvek®	
	
<p>Matériel nécessaire : Tyvek® (30x50, pour avoir de la marge) ; indicateur polluant et intercalaire de papier de soie ; clip ; ciseaux ; équerre ; fil de polyester blanc cassé ; crayon ; scie ; lime.</p>	<p>Après avoir plié la feuille Tyvek® en deux et de manière symétrique (obtenant ainsi un rectangle de 30x25 cm), tracer au crayon fin les futures lignes de coutures de la pochette.</p>

¹¹⁵ Les poussières favorisent les processus d'hydrolyse et de contamination biologique, car elles représentent des sites hygroscopiques.



Dans le cas présent, j'ai réalisé les coutures à l'aide d'une machine à coudre traditionnelle, en suivant les lignes préalablement tracées, de manière à obtenir des coutures les plus rectilignes possibles.

Vue de la pochette après réalisation des coutures, découpe des surplus de fils et ajustement des bords.

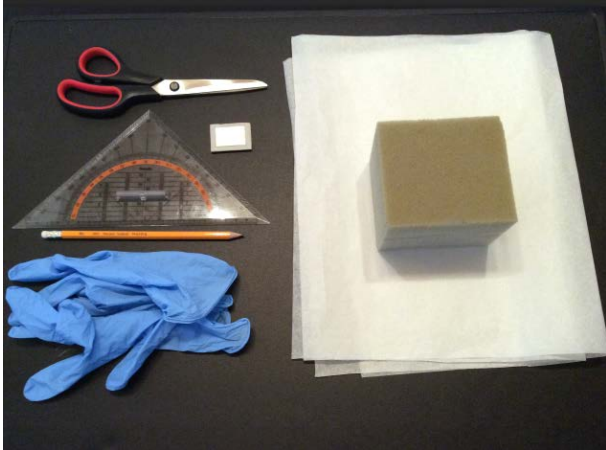





Préparation des clips en PP : couper les clips à la scie selon la longueur nécessaire pour la fermeture complète de la pochette (soit ici 26 cm¹¹⁶). Suite à cela, limer les extrémités de manière à ne pas créer de zones coupantes (risque de déchirure de la pochette).

¹¹⁶ Pour une pochette de 25 cm de largeur, ce qui permet une marge sur les côtés permettant de retirer plus facilement le clip lors des observations de l'échantillon.

	
<p>Il ne reste plus qu'à placer l'échantillon dans la pochette avec l'indicateur papier (en veillant à intercaler un rectangle en papier de soie).</p>	<p>Résultat final : l'échantillon est tenu dans sa pochette en Tyvek (avec l'indicateur papier), fermée par un clip en PP.</p>
<p style="text-align: center;">Avantages</p>	<p style="text-align: center;">Désavantage</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Système qui ne requiert que très peu de matériaux - La polyvalence du <i>Tyvek</i>® fait que les possibilités d'assemblages des pochettes sont nombreuses - Permet une ventilation naturelle tout en écartant le risque d'accumulation de poussières à la surface de l'objet et d'exposition directe aux rayons lumineux. - Protège des insectes et autres organismes rampants, de la lumière et sert d'intercalaire avec la surface sur laquelle l'échantillon est placé. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le <i>Tyvek</i>® se tache rapidement - le système n'intègre pas de produits/dispositifs visant à réguler l'hygrométrie ou inhiber l'action corrosive des polluants (si ce n'est une aération naturelle grâce à sa structure micro-perforée).
<p>Précaution</p>	
<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un dépoussiérage régulier de la surface - <i>Tyvek</i>® à changer en cas de déchirure 	

Tableau 28 Méthode 7

Méthode 7 : emballage en papier de soie	
	
<p>Matériel nécessaire : papier de soie (60x60 cm) ; indicateurs polluants ; ciseau ; règle ou équerre ; crayon de papier</p>	<p>Découper deux lanières d'environ 60 cm de long pour 2-3 cm de large</p>
	
<p>Placer l'échantillon sur le papier de soie, découpé au préalable selon les dimensions de l'échantillon (adaptées à un emballage de type «cadeau »)</p>	<p>Placer le dispositif indicateur papier sur la mousse, en veillant à intercaler un morceau de papier de soie (pour limiter au maximum toute interaction (d'ordre mécanique ou chimique) avec l'échantillon.</p>



Procéder à l'emballage de type « cadeau » de l'échantillon, ce qui permettra de recouvrir toute la surface de l'échantillon : commencer par rabattre un des côtés du papier de soie.



Rabattre le second côté sur le premier.



Plier les extrémités en vue de les rabattre.





Après avoir rabattu les extrémités, réaliser une nouvelle fois l'opération, de manière à doubler la couche de protection



Après avoir effectué le second emballage, il faut



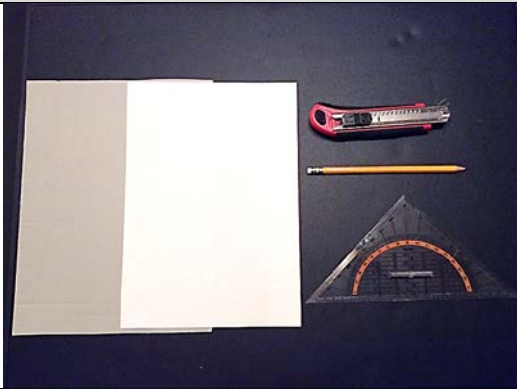
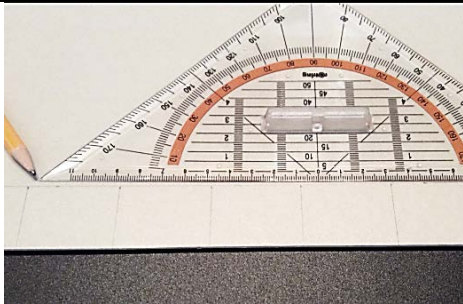
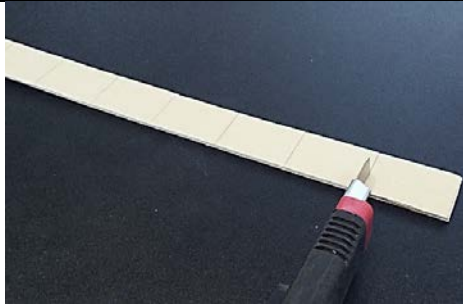
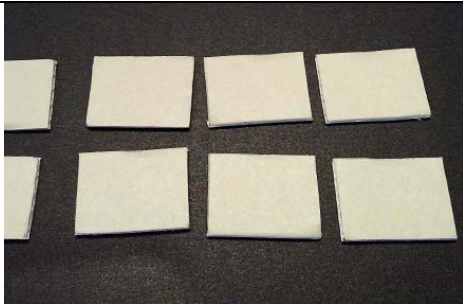
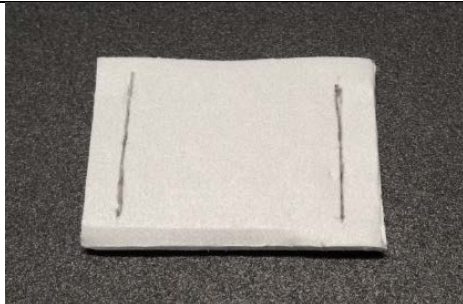
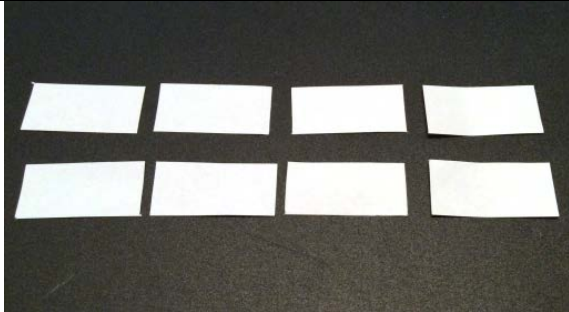
Effectuer les nœuds sur le dessus de l'échantillon,


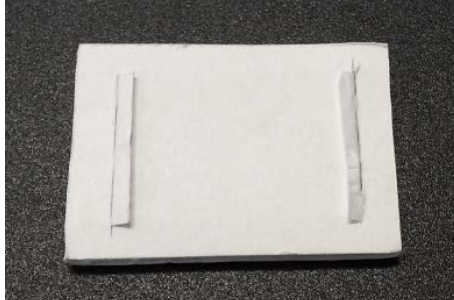

faire tenir le tout grâce aux lanières. Placer ces dernières en croix sous l'emballage.	en veillant à ne pas serrer trop fort (au risque de compresser l'échantillon ¹¹⁷)
	
<p>Résultat final : l'échantillon est contenu dans un double emballage de type « cadeau » en papier de soie, avec un dispositif indicateur de polluants.</p>	
Avantages	Désavantages
<p>Action protectrice sur différents facteurs de dégradation principaux (lumière, polluants, poussières,...)</p> <p>Facilement mis en œuvre</p> <p>Surface non-abrasive</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Le papier de soie se froisse et se déchire facilement - le système n'intègre pas de produits/dispositifs visant à réguler l'hygrométrie ou à inhiber l'action corrosive des polluants
Précaution	
<p>Ne pas utiliser de papier de couleur (bleu,...), les additifs utilisés étant instables.</p> <p>Lorsque l'on utilise des papiers de soie sans acide, qui plus est sans charge alcaline, il est recommandé de vérifier régulièrement l'état de ce dernier (changement de couleur souvent synonyme d'une modification de son pH) et de le changer si besoin. ¹¹⁸</p> <p>Remplacer le papier en cas de déchirure.</p>	

¹¹⁷ Les lanières en papier de soie ont l'avantage de se déchirer si elles sont trop serrées, ce qui est un bon marqueur pour s'assurer que le dispositif n'est pas sous forte tension. Par ailleurs, du ruban coton de type Serger pourrait également être utilisé pour fabriquer les lanières, mais ceci coûterait plus cher, les risques de compresser l'échantillon serait plus élevés et comme il ne s'agit pas du même matériau (que le papier de soie), ils peuvent réagir de façon différente à leur environnement. Ce qui peut occasionner des altérations pour l'échantillon (par phénomène de rétraction/dilatation).

¹¹⁸ Préserv'Art, 2014 [en ligne]

Tableau 29 Préparation des indicateurs de polluants

Préparation des indicateurs de polluants	
	
Matériel : carton ondulé non-acide (3mm) ; cutter ; règle-équerres ; crayon de papier ; papier acide	
 <p>a. Tracer les rectangles de 3x4 cm sur le carton</p>	 <p>B. Découper les différents rectangles au cutter</p>
 <p>c. Obtention des supports en carton</p>	 <p>d. Réaliser des entailles aux extrémités des cartons (à 0.5 cm des bords) et de la longueur des papiers (2cm)</p>
Préparation des rectangles en carton de 3x4 cm	
	
Préparation des rectangles de 2x4 cm en papier acide (selon le même procédé que les supports en carton)	

	
<p>Insérer le papier dans les fentes</p>	<p>Rabattre les extrémités du papier à l'arrière du support cartonné</p>
<p>Assemblage des rectangles de papier acide sur les supports en carton</p>	
	
<p>On obtient ainsi des sortes de petits écrans, facilement utilisables. Le carton permet un meilleur maintien mécanique du papier (limite le risque de pliures/déchirures) et sert également d'intercalaire pour limiter toutes interactions fâcheuses dues à sa nature acide¹¹⁹.</p>	

Annexe 28 : Calcul des doses de produits pour les méthodes de conservation 1, 2 et 3

Tableau 30 Calcul des doses des sorbants

<p>Calcul de dose de System RP-20K®</p>	
<p>Le calcul de la quantité de <i>RP-K System</i>® à placer dans le conditionnement est donné précisément par le fabricant Mitsubischi selon une équation prenant en compte le volume de la pochette et celui de l'échantillon.</p>	
<p>Recommandation du Fabricant Mitsubishi</p>	
<p>1. Estimer le volume d'air à traiter</p> <p>Equation :</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin: 10px 0;"> $\text{Air volume (ml)} = \text{Total volume(ml)} - \frac{\text{Weight (g)}}{\text{Specific gravity of the content}}$ </div> <p style="text-align: right; margin-right: 50px;">©Mitsubishi</p>	

¹¹⁹ La petite taille des rabats permettant le maintien du papier au carton a également été pensée pour limiter la zone de contact entre ce matériau acide et les autres éléments constitutifs des conditionnements.

Volume total (ml) : le volume de la pochette (largeurxlongueurxépaisseur) = $20 \times 31 \times 6.5^{120} = 4030 \text{ ml}$

Weight/Masse (g): envri. 80g

Specific gravity of the content/densité : estimer une densité moyenne prenant en compte l'échantillon mais également les autres éléments (boîte PP, pochette ESCAL®). En admettant une densité moyenne des mousses PUR 0.003 g/cm^3 (qui compose à 75% le volume des éléments contenus), et une densité moyenne du reste des autres éléments d'environ 2 g/cm^3 (25%) on considère une densité moyenne de 0.5 g/cm^3

Volume d'Air à traiter : $4030 - (80/0.5) = 3870 \text{ ml}$

2. Sélection de l'agent RP

Corresponding air volume	
RP-1A:100ml	RP-3A, RP-3AH:300ml
RP-5A:500ml	RP-20A:2000ml

©Mitsubishi

Sachets RP (K ou A) existant :

Les sachets **RP-20K®** permettent de traiter 2'000 ml d'air. En admettant une marge de sécurité permettant de s'assurer de la bonne efficacité du traitement de mise en anoxie, 3 sachets devront être placés dans la pochette (soit une capacité de traitement de 6'000 ml).

Comme me l'a confié M. Thobias Schenckel, il est préférable de rajouter une petite quantité de produits pour être sûr de l'adsorption complète de l'O₂ et des polluants, tout en veillant ce que cette marge de sécurité n'implique un retrait plus important que 20% (ce qui pourrait causer une compression de l'échantillon). De plus, la composition particulière de la mousse (constituée à 97% d'air) rend presque négligeable la soustraction du volume de matière au volume total de la pochette.

Calcul des doses de gel de silice et de charbon actif pour les méthodes 3 et 4

Le calcul des doses des différents produits utilisés pour les méthodes de conservations à long terme peut parfois être sujet à quelques discordes entre les fournisseurs spécialisés et les professionnels de la conservation-restauration, notamment dans le cas du gel de silice¹²¹, où plusieurs types existent sur le marché. Les doses prescrites par les fournisseurs pour les produits sorbants sont des ordres de grandeurs qui ne tiennent pas compte de certains paramètres, comme la nature et les dimensions de l'objet conditionné ou encore la durée d'utilisation du produit. Pour remédier à cela et proposer les

¹²⁰ La pochette de base était de 22x32, mais après de l'échantillon les dimensions de cette dernière varient. C'est pourquoi il est difficile d'anticiper le volume total du contenant (et de la masse également) avant d'avoir mesuré les dimensions de la pochette en temps réel (mesure qui s'effectue bien entendu au préalable de la fermeture du sachet).

¹²¹a. Tétreault, 2003, p.61

doses les plus adéquates, je me suis basé sur les équations fournies par Jean Tétréault dans son ouvrage dédié aux polluants dans les musées (*J. Tétréault, 2003*)¹²².

Calcul de la quantité de gel de silice type E microporeux®

Dans son ouvrage consacré aux polluants, Tétréault préconise de calculer la dose selon l'équation suivante¹²³ :

Équation 4

$$Q = (C_s D V N t) / (M_H F)$$

où Q = quantité de gel de silice recommandée (kg)^a
 C_s = concentration de vapeur d'eau de saturation (g m⁻³)^b
 D = différence décimale entre le taux d'HR à l'extérieur de l'enceinte et le taux d'HR cible dans l'enceinte (pas d'unité)^c
 V = volume d'air net dans l'enceinte (m³)
 N = taux de renouvellement d'air (1/jour)^d
 t = nombre minimal de jours pendant lesquels l'intervalle cible du taux d'HR doit être maintenu (jour)
 M_H = capacité tampon du gel de silice utilisé, incluant l'effet de l'hystérésis (g kg⁻¹ %HR⁻¹)^e
 F = intervalle cible de fluctuation du taux d'HR (%)^f

C_s : pour une t° de 22.5 °C, elle équivaut à **20 gm⁻³**

D : en admettant que le taux d'HR entourant le contenant est de 40% et que l'HR cible est de 50%, la différence correspond à D=**0.1**.

V : **0.0053m³** (27x17x11.5)

N : *si la mesure précise d'étanchéité est inconnue, une valeur d'1 échange d'air/jour est communément retenue*¹²⁴.

t : 365 jours

M_h : estimé à 3.3

F : 10 (fluctuation maximale admissible +/- 5%)

$$\begin{aligned} Q &= (C_s D V N t) / (M_H F) \\ &= (20 \times 0.10 \times 0.0053 \times 1 \times 365) / (3.3 \times 10) \\ &= 3.869 / 33 \\ &= \mathbf{0.117 \text{ kg soit } 117\text{g}} \end{aligned}$$

De plus, pour vérifier le résultat Tétréault donne l'ordre de grandeur moyen suivant : 20kg/m³, soit 104g pour un volume de 0.0052 m³, ce qui est très proche des 117g obtenus par l'équation.

Dose finale préconisée : en admettant une petite marge de sécurité je préconise **120g** (pour assurer son efficacité, mieux vaut plus de produit que pas assez). Par ailleurs, en prenant en compte les qualités de matériau tampon du carton alvéolé, la valeur M de l'équation peut être revue à la hausse (environ 4.3), donc la quantité de gel de silice à utiliser est moindre, soit **90g**.

Il est également judicieux de procéder à un contrôle ponctuel régulier du taux d'humidité de l'intérieur des conditionnements de manière à s'assurer de l'adéquation des quantités conditionnées.

¹²² a.Tétréault, 2003, p.62

¹²³ Ne pouvant disposer à l'heure actuelle de toutes les variables permettant de réaliser l'équation (comme les conditions environnementales offerte par la réserve où seront contenus les échantillons, puisque celle-ci n'a pas encore été définie par le musée), j'ai complété ces dernières en me basant sur des paramètres moyens annuels d'une enceinte donnés par a.Tétréault, 2003.

¹²⁴ a.Tétréault, 2003, p.62

Dans le cas présent, un changement ou régénération du gel de silice doit être effectué tous les ans¹²⁵. Pour une plus longue période d'utilisation, il suffit de multiplier la dose (prévue pour 1 an) par le nombre d'années désirées (ex : pour deux ans, sans avoir à le régénéré/remplacé, 240g de gel de silice sont nécessaires dans le conditionnement).

Calcul de la quantité de Prosorb¹²⁶

Suivant les recommandations *Tétreault/Weintraub (2003)*

M_h : estimée à 8.4¹²⁷

$$Q = (C_s D V N t) / (M_h F)$$

$$= (20 \times 0.1 \times 0.0053 \times 1 \times 365) / (8.4 \times 10)$$

$$= 3.869 / 84$$

$$= \mathbf{0.046 \text{ kg soit } 46g}$$

En suivant le même raisonnement que pour le gel de silice type E, je préconise une quantité de **50g** pour les boîtes en PP et de **41g** (M_h : 9.4¹²⁸) pour la boîte en carton.

Calcul de la quantité de charbon actif

Dans son ouvrage consacré aux polluants, Tétreault préconise de calculer la dose selon l'équation suivante¹²⁹

Équation 3

$$Q = (C_{Ex} V N + E S) t / (P C_{In})$$

où Q = quantité de sorbant recommandée (g)^a
 C_{Ex} = concentrations de polluants à l'extérieur de l'enceinte ($\mu\text{g m}^{-3}$)
V = volume d'air net dans l'enceinte (m^3)
N = taux de renouvellement d'air (1/jour)^b
E = taux d'émission du produit polluant à un endroit précis ($\mu\text{g m}^{-2} \text{ j}^{-1}$)^c
S = surface exposée du produit émetteur (m^2)
t = nombre minimal de jours pendant lesquels les concentrations de polluants dans l'enceinte doivent demeurer inférieures à C_{In} (jour)
P = capacité tampon spécifique du sorbant ($\mu\text{g g}^{-1} \mu\text{g}^{-1} \text{ m}^3$)
 C_{In} = concentrations maximales acceptables des polluants à l'intérieur de l'enceinte ($\mu\text{g m}^{-3}$)

C_{Ex} : concentration moyenne de NO₂ à l'extérieur d'une enceinte est de $10 \mu\text{g m}^{-3}$

V : 0.0053

N : 1x/jour (moyenne d'étanchéité d'une enceinte)

E : 50, en supposant que la mousse continue à dégazer (en me basant sur des matériaux connus pour dégazer des COV et présentant un âge de plus de 15 ans)

S : 0.01 m^2

T : 365 jours

P : 7.29 pour le NO₂

C_{In} : l'objectif est de maintenir à moins de $1 \mu\text{g m}^{-3}$ la concentration en NO₂

¹²⁵ a. Tétreault, 2003, p.6

¹²⁶ b. Waller, 2014 [en ligne]

¹²⁷ Pour une HR comprise entre 40-60%

¹²⁸ 9.4 correspond à la capacité tampon du Prosorb (8.4) additionné aux qualités tampon du carton (estimé à +1)

¹²⁹ a. Tétreault, 2003, p.58

$$Q = (C_{Ex} V N + E S) t / (P C_{In})$$

$$= (10 \times 0.0053 \times 1 + 0.5) \times 365 / (7.29 \times 1)$$

$$= \mathbf{27,69g}^{130}$$

Dose finale préconisée : ne connaissant pas la teneur en polluants du milieu dans lequel seront conditionnés les boîtes ni d'ailleurs précisément la quantité de COV encore émise par les échantillons, il est préférable de préconiser une dose légèrement plus importante pour garantir une marge de sécurité, soit **30g**.

Tableau récapitulatif des doses adéquates des produits sorbants à utiliser			
Conditionnement	Gel de silice (g)		Charbon actif (g)
	Type E (g)	Prosorb (g)	
Boîtes PP (0.0053 m3)	120	50	30
Boîtes carton (0.0053 m3)	90	41	30
	Sachet RP-K[®]		
Pochette anoxie (5080 ml)	3 sachets RP-20K [®]		

Annexe 29 : Recommandations pour le stockage et la manipulation des échantillons tests

Tableau 31 Recommandations d'après traitement

Stockage ¹³¹		
Température (°C)	18-20°C	C'est avant tout la stabilité de ces deux paramètres qui doit être recherchée
Humidité relative (%)	50 % (+/- 5)	
Luminosité	La plus basse possible (stocker dans un local sombre). 50 Lux maximum (dans le cas d'une exposition)	
Autres	Stocker dans une zone propre et assurer également une bonne ventilation de l'espace pour éviter la stagnation et la concentration élevée en polluant	
Manipulations		
- Manipuler le moins possible les échantillons et avec des gants (ou avec les mains lavées)		
- Effectuer un constat d'état régulier de l'échantillon et du conditionnement associé (à l'aide de la fiche de suivi spécialement réalisée à cet effet) pour voir l'évolution de son stockage/conservation et		

¹³⁰ Tétreault, 2003, p.58-60

¹³¹ Ramel, 2007, p.6 et Doyal, 1999, p.28-29.

déceler d'éventuelles dégradations. Il est également recommandé de dépoussiérer régulièrement la surface de ces derniers pour éviter toute influence néfaste de la poussière.

- Suivre les précautions spécifiques présentées pour chaque méthode

Annexe 30 : Liste de fournisseurs

Produits pour les méthodes de conservation à long terme	
Fournisseurs	Matériaux disponibles
Plastic-Haus AG Fabrimattenweg 15 4144 Arlesheim Tel. 061 706.29.99 e-mail : info@plastic-haus.ch	→ Mousse fine PE non-réticulée à macrocellule fermée (<i>Ethafoam</i> [®])
Stouls 9/11 rue de l'Orme Saint Germain 91165 Champlan Cedex, France Tel. : 0033 (0)1 69 10 10 70 e-mail : conservation@stouls.fr	→ Matériel pour la réalisation de la boîte en carton : plaque de carton ondulé non-acide ; rivets de PP ; mousse PE réticulée ; papier de soie non-acide → <i>Tyvek</i> [®]
Atlantis 35 rue du ballon 93160 Noisy-le-Grand, France Tel. : +33(0)1 60 93 15 60 e-mail : contact@atlantis-france.com	→ Matériel de mise en anoxie : <i>RP-K System</i> [®] ; <i>Ageless Eyes</i> [®] ; Films et pochettes barrières (<i>ESCAL</i> [®] , ...) ; clips de fermeture. → Gel de silice et <i>Prosirob</i> [®] → Mousse PE réticulée
Long Life of Art Long Life for Art Christoph Waller Hauptstraße 47 D-79356 Eichstetten Tel: +49 (0) 7663 608 99-0 E-Mail: info@llfa.de	→ Carton non-acide → Charbon actif (Long Life of Art)
RECTOLAB S.A. Route Cantonale 10 1077 Servion, Suisse Téléphone: +41 21 903 32 32 E-mail: info@reactolab.ch	→ Charbon actif
Migros Garden	→ Boîtes <i>Rako</i> [®]

<p>Suisse Tél. : 0848 84 0848 Site web : http://www.migros.ch</p>	<p>→ Boîtes PP ou PEHD → Aluminium Alimentaire</p>
<p>Georg Utz AG Au graben 2-4 5620 Bremgarten Suisse Phone: +41 56 648 77 11 E-Mail: info.ch@utzgroup.com</p>	<p>→ Boîtes Rako®</p>
<p>Minigrip.be Chaussée de Gand, 360 1080 Bruxelles. Belgique. Tel: ++ 32.2.410.71.51 minigrip@minigrip.be</p>	<p>→ Sachets <i>Minigrip</i>®</p>
Mousses de substitution	
<p>Sealed Air (France) Phone: +33 3 8692 0431 Email: specialtymaterials-emea@sealedair.com</p> <p>Quality Foam Packaging 31855 Corydon Street • Lake Elsinore • CA • 92530 Tel: 951-245-4429 Email: sales@qualitycase.com</p>	<p>Mousse PE <i>Ethafoam</i>® 4101</p>
<p>Stouls 9/11 rue de l'Orme Saint Germain 91165 Champlan Cedex France Tel. : 0033 (0)1 69 10 10 70 e-mail : conservation@stouls.fr</p> <p>CALTECH SARL Champ la lioure 07210 CHOMERAC Mail : commercial@caltech.fr Tél. : 0475650168</p>	<p>Mousse PE <i>Plastazote</i>® (45kg/m³)</p>
<p>MOUSSE CONCEPT ZA le Bouillou 43200 St Maurice de Lignon</p>	<p>Mousse PUR polyéther (28kg/m³) Mousse PUR HR</p>

<p>Tél. : +33 (0)4.71.59.45.22 Mail : moussesurmesure@gmail.com</p> <p>Mousse et Confection ADP (Aéroport de Paris Orly, France) Tél : 04 42 29 47 08 Mail : <i>mousseconfection@gmail.com</i></p>	
---	--

Crédits photographiques

Sauf mentions contraires, les photographies et illustrations présentées sont la propriété de Baptiste Prétôt et de la HEArc C-R de Neuchâtel : ©HEArc C-R, B.P.

Table des illustrations

Figure 1 Le terrain entre Dugny et le Bourget furent réquisitionnés pour les besoins de la Guerre.....	3
Figure 2 Dimensions de la Caravelle 12	10
Figure 3 Vue schématique générale de la cabine	11
Figure 4 Vue zoomée de la cabine	12
Figure 5 Vue en coupe transversale de la cabine	12
Figure 6 Autres aménagements de la Caravelle 12.....	13
Figure 7 Les travées sont indiquées par une lettre	13
Figure 8 Disposition des housses de protection.....	14
Figure 9 Plan de localisation des échantillons.....	14
Figure 10 Soulèvement de la moquette	15
Figure 11 Élément métallique au sol	15
Figure 12 Différents dépôts exogènes	15
Figure 13 Pelote de réjection d'oiseau et cadavre d'insecte.....	15
Figure 14 Dégradation des installations techniques	15
Figure 15 Compartiments de conservation des aliments lacunaire	15
Figure 16 Parties constitutives d'un siège d'avion.....	16
Figure 17 Siège pilotes avec schémas de ses dimensions (cm)	17
Figure 18 Siège co-pilote et schémas de ses dimensions	18
Figure 19 Le revêtement en cuir des accoudoirs et la housse de protection sont dégradés	19
Figure 20 Tabouret co-pilote et schémas des dimensions de l'assise	19
Figure 21 Housse du dossier déchirée et assise présentant des taches et des marques de corrosion .	20
Figure 22 Sièges Stewart et schéma de ses dimensions	20

Figure 23 Ossature de l'assise corrodée et perte d'adhérence du velcro	21
Figure 24 Le joint en caoutchouc peut être à l'origine de la dégradation avancé de la mousse.....	28
Figure 25 Composition du rembourrage des sièges pilotes.....	29
Figure 26 Composition du rembourrage des sièges co-pilotes	29
Figure 27 Composition du rembourrage du tabouret co-pilote.....	30
Figure 28 Composition du rembourrage des sièges Stewart.....	30
Figure 29 Pour les tests d'identification seul un échantillon de petite taille suffit.	33
Figure 30 Matériel nécessaire	34
Figure 31 Boîtes de protection en PP des échantillons prélevés.....	35
Figure 32 Echantillon TI.01.15.....	36
Figure 33 Les mousses claires présentent une meilleure flottaison que celle de couleur foncée.....	43
Figure 34 La mousse de type B.....	43
Figure 35 L'opération doit se dérouler sous aspiration	49
Figure 36 TI.01.15 (x5).....	54
Figure 37 TDI.06.15 et TDI.08.15 (x5).....	54
Figure 38 TI.01.15 (x10).....	54
Figure 39 TDI.06.15 (x20).....	54
Figure 40 TD1.06.15 (x10).....	54
Figure 41 TDI.08.15.....	54
Figure 44 TI.09.15 (x20).....	55
Figure 45 Cellules de mousse PUR partiellement rompues.....	55
Figure 46 Structure en nid d'abeille caractéristique des mousses PU.	55
Figure 47 Agrandissement de la structure en nid d'abeille	55
Figure 48 TI.09.15 (x5).....	55
Figure 49 TI.09.15 (x10).....	55
Figure 50 TI.04.15 : Présence de dépôts exogènes (fils) en surface de la mousse	56
Figure 51 TI.03.15.....	56
Figure 52 TI.14.15 : Altération de la structure en nid d'abeille 1	56
Figure 53 TI.15.15 : Altération de la structure en nid d'abeille 2	56
Figure 54 TI.02.15.....	56
Figure 55 TI.08.15.....	56
Figure 56 Dispositif MEB-EDS	57
Figure 57 Placement des micro-échantillons dans le dispositif MEB-EDS	58
Figure 58 TI.01.15 (1)	59
Figure 59 TI.01.15 (2)	59
Figure 60 TI.05.15.....	59
Figure 61 TI.06.15.....	59
Figure 62 TI.08.15.....	59

Figure 63 TI.09.15	59
Figure 64 Spectre TI.05.15 (mousse type C1)	60
Figure 65 TI.06.15 (mousse type B)	60
Figure 66 TI.01.15 (mousse type A1)	60
Figure 67 Spectre correspondant à l'échantillon TI.01.15	63
Figure 68 Spectre TI.08.15 en rouge et spectre de référence	63
Figure 69 Spectre TI.06.15 en partie supérieure	64
Figure 70 Dans le cas présent, le spectre TI.05.15.....	65
Figure 71 Spectre ...(en rouge) et spectre de référence (mousse PUR éther) en bleu.....	65
Figure 72 Spectre de l'échantillon du matelas	66
Figure 73 Chaque couleur est caractérisée par un code couleur spécifique	84
Figure 74 Boîte en une seule pièce,	101
Tableau 1 Chronologie des différents types de Caravelle	7
Tableau 2 Caractéristiques techniques de la Caravelle 12	9
Tableau 3 Caractérisation des mousses	22
Tableau 4 Récapitulatif des échantillons prélevés.....	37
Tableau 5 Résultats des tests de flottaison	42
Tableau 6 Résultats des tests de densité	44
Tableau 7 Historique des plastiques	45
Tableau 8 Procédure du test pH	47
Tableau 9 Résultat des tests pH	48
Tableau 10 Procédure du test diméthylamino(benzaldéhyde)	50
Tableau 11 Résultat des tests (diméthylamino)benzaldéhyde	52
Tableau 12 Procédure de l'analyse FTIR.....	62
Tableau 13 Code couleur des mousses.....	67
Tableau 14 Caractéristiques physico-chimiques des mousses PUR éther.....	67
Tableau 15 EPI recommandé.....	68
Tableau 16 Protocole de retrait des rembourrages des sièges Stewart et (co)pilotes	72
Tableau 17 Récapitulatif des facteurs de dégradation	78
Tableau 18 Fiche de suivi des échantillons	79
Tableau 19 Tests de toucher et mécaniques à réaliser	85
Tableau 20 Identification de la mousse testée	88
Tableau 21 Préparation des échantillons	91
Tableau 22 Méthode 1	92
Tableau 23 Méthode 2	94
Tableau 24 Méthode 3	97
Tableau 25 Méthode 4	102

Tableau 26 Méthode 5	104
Tableau 27 Méthode 6	106
Tableau 28 Méthode 7	109
Tableau 29 Préparation des indicateurs de polluants	112
Tableau 30 Calcul des doses des sorbants	113
Tableau 31 Recommandations d'après traitement	117