

Résumé

La consolidation des dessins de grand format par un support de renfort, pose le problème du choix des matériaux.

Auparavant, des restaurateurs appliquaient au revers du dessin une toile de lin, cette méthode s'assimile au rentoilage traditionnel des peintures. L'évolution des techniques et des méthodes de consolidation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les non-tissés. Nous avons travaillé sur une série de matériaux différents, papiers japon; RK 17 et RK 19, papier ancien du XIX et deux types de non-tissés; le REEMAY et le CEREX. Dans une première étape, nous avons étudié les comportements de chacun de ces matériaux. Ensuite nous avons simulé différents doublages afin d'analyser leur comportement mécanique. La méthode d'analyse est basée sur un suivi des tensions durant les opérations de collage et un suivi des tensions lorsque le doublage est soumis à de brusques variations hygrométriques.

Mots-clés

Assemblage, collage, contrainte, dessin, doublage, durée de vie, mouillage, non-tissé, papier, renfort, séchage, stabilité, tension

Etude du comportement mécanique des dessins de grands formats doublés sur des matériaux non-tissés

Alain Roche

Service de Restauration des Musées de France
2 avenue Rockefeller, 78000 Versailles, France

Introduction

Les papiers sont des matériaux fragiles, ils ont une résistance limitée à la déchirure et aux coups. La dégradation du papier est liée à la superposition du vieillissement chimique et de la fatigue mécanique. Dans un dessin de grand format sa propre masse peut provoquer des sollicitations mécaniques susceptibles d'entraîner au cours du temps des altérations du papier.

Pour assurer la stabilité mécanique et dimensionnelle d'un dessin dégradé de grandes dimensions, le restaurateur dispose des techniques de doublage suivantes; doublage traditionnel sur papier, doublage sur toile de fibres naturelles, doublage sur non-tissé de fibres synthétiques.

Pour les dessins de grand format, le doublage sur toile et le montage sur châssis est encore la technique la plus utilisée. Toutefois la tension d'un dessin entoilé sur un châssis peut-être à l'origine de plusieurs types d'altérations. A faible humidité le papier a tendance à se rétracter.¹ Puisqu'il est retenu par le collage, les contraintes vont s'accroître. Dans le cas où la résistance à la rupture du papier est amoindrie et qu'il subit de fréquentes chutes d'humidité, des déchirures peuvent apparaître. A humidité élevée la toile va avoir tendance à se tendre^{2,3} alors que le papier se détend. Ces comportements opposés entraînent des forces de cisaillement. Par ailleurs l'humidité provoque l'affaiblissement des forces d'adhésion. Lorsque ces deux phénomènes conjoints se répètent dans le temps ils peuvent être à l'origine du décollement de la toile et du papier ou de la formation de cloques. La structure de la toile peut-être aussi une source d'altérations optiques lorsque la toile s'imprime dans la feuille de papier pour y laisser son empreinte.

Dans un doublage sur toile de fibres naturelles les dégradations provoquées par les différences de comportement entre le papier et la toile lors de sollicitations externes, ont amené les restaurateurs à rechercher des matériaux de substitution. Ces matériaux doivent apporter au papier, le complément de résistance mécanique qui lui fait défaut et la stabilité qui lui est nécessaire. Les non-tissés de fibres synthétiques semblent répondre à ces critères.

Actuellement dans la pratique du doublage d'un dessin grand format le choix de tel ou tel de ces matériaux synthétiques ne repose que sur des appréciations subjectives. C'est cette raison qui nous a conduits dans cette étude à nous intéresser avant tout au comportement mécanique des doublages sur deux types de non-tissés; l'un hydrophile, l'autre hydrophobe.

Etude du collage dans les doublages sur non-tissé

Le doublage d'une oeuvre sur papier correspond à une succession de collage de matériaux de même nature ou de nature différente. En consolidant un dessin par doublage nous le transformons en une feuille multicouche. Cette opération modifie profondément la structure et le comportement du dessin original.

Nous avons étudié les collages suivants, collage du RK 17 sur du REEMAY 2024 et le collage du RK 17 sur le CEREX 202.

Origine des tensions

Rappelons que des tensions apparaissent durant le séchage par le simple fait qu'il existe une relation entre les déformations, les contraintes et les propriétés élastiques des matériaux.^{4,5} En terme de mécanique nous exprimons cette relation par:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

σ : contrainte (MPa)

ε : déformation

E: module d'élasticité (MPa)

La contrainte est aussi le résultat du rapport d'une force par une surface ou d'une section dans le cas d'une feuille ou d'un film. Elle s'exprime par:

$$\sigma = F/S \quad (2)$$

F: force en (N)

S: surface ou section (m²)

Les variations de contraintes se manifestent dans un textile ou un papier tendu sur un cadre indéformable par une variation de tension comme le montre la relation suivante:

$$T = \sigma \cdot e \quad (3)$$

T: Tension linéaire (N/m)

e: épaisseur en (m)

Evaluation de l'état de contraintes

Pour évaluer les contraintes résiduelles d'un matériau ou d'un assemblage de matériaux nous avons choisi des collages simples de 2 feuilles de nature différente en suivant le protocole expérimental suivant. Nous avons tendu sur notre cadre extensiométrique⁶ les non-tissés de polyester et de polyamide. Cet appareil permet de suivre l'évolution des tensions de toutes les membranes tendues (toiles, papiers, non-tissés, doublages,...) soumises à une opération de restauration ou à un changement de conditionnement. La tension initiale de ces non-tissés est de 15 daN/m. Nous avons simultanément encollé la feuille libre et le non-tissé tendu avec un mélange de Plextol B 500 et de Carboxyméthylcellulose.^{7,8} Ensuite nous avons positionné et appliqué la feuille libre sur le non-tissé tendu et à l'aide d'une brosse douce nous avons chassé toutes les bulles d'air de manière à obtenir le meilleur contact entre les feuilles. Puis nous avons laissé sécher le collage en enregistrant l'évolution des tensions.

L'évaluation des contraintes résiduelles qui résident dans un matériau ou un assemblage de matériaux à la suite d'une opération de mouillage ou de collage peut s'exprimer par la différence entre les laccusion d'équilibre et le minimum (ΔT) enregistrées (Figure 1).

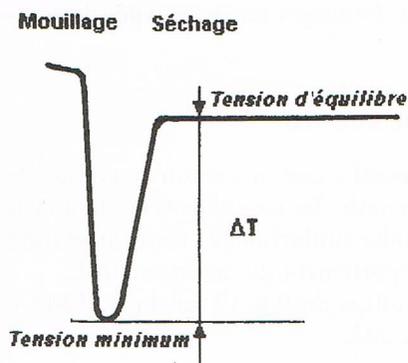


Figure 1. Etat de contraintes résiduelles.

Evaluation de la stabilité mécanique aux variations de l'humidité

Les oeuvres sur papier peint subissent au cours de leur vie des écarts d'hygrométrie et de température plus ou moins importants. Cette alternance de climat sec et humide associée à d'autres facteurs, contribue au vieillissement de l'oeuvre et à la formation d'altérations. Pour les matériaux hydrophiles les écarts d'hygrométrie sont de véritables facteurs de dégradation.⁹ Nous avons voulu examiner, à l'aide d'une série d'essais, le comportement des non-tissés, des papiers et des doublages aux variations d'humidité. La procédure expérimentale se déroule en 2 étapes. Le matériau ou le doublage tendu sur le cadre extensiométrique subit dans un premier temps un mouillage suivi d'un séchage. Le cadre est maintenu à une humidité d'environ 50% jusqu'à la stabilisation des tensions des matériaux tendus. Ensuite il est introduit dans une enceinte climatique. Le conditionnement à 20% et 95% se

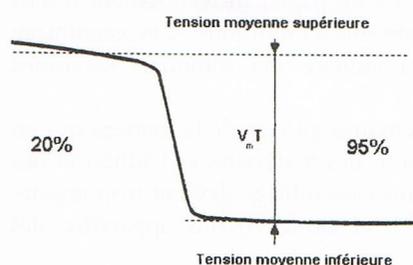


Figure 2. Réactivité des matériaux ou des assemblages.

Tableau 1. Valeurs de l'état de tensions résiduelles ΔT des matériaux et assemblages

	Sens machine (sm) ΔT_{sm} (daN/m)	Sens travers (st) ΔT_{st} (daN/m)
RK 17	2,71	3,93
REEMAY 2024	0,12	1,25
CEREX 202	14,81	18,36
RK17/R2024	2,48	
RK17/C202	13,65	14,36

Tableau 2. Valeurs moyenne $V_m T$ de la réactivité à l'humidité des matériaux et assemblages

	Sens machine (sm) $V_m T_{sm}$ (daN/m)	Sens travers (st) $V_m T_{st}$ (daN/m)
RK17	7,17	8,47
REEMAY 2024	4,6	4,7
CEREX 202	37	51,39
RK17/R2024	5,09	7,92
RK17/C202	37,74	46,99

fait dans une enceinte de conception simple.¹⁰ Le climat sec (environ 20%) est obtenu par la présence de silica gel déshydraté réparti dans l'enceinte. Le climat humide (environ 95%) est produit par l'évaporation d'eau contenue dans des récipients. Un système de ventilation brasse l'air et rend le climat à l'intérieur à l'enceinte homogène. Le contrôle de l'humidité est assuré par une sonde thermohygrométrique. Lorsque le matériau tendu sur le cadre est introduit dans l'enceinte, nous lançons l'enregistrement des tensions toutes les 30 minutes. Le climat sec est maintenu environ une soixantaine d'heures et le climat humide est conservé pendant une cinquantaine d'heures. L'humidité s'élève à 95% en moins de 3 heures. L'enregistrement des tensions est arrêté après les 115 heures de conditionnement. Les matériaux sont donc soumis à une forte variation d'humidité.

L'évaluation de la stabilité mécanique aux variations d'humidité $V_m T$ est obtenue en faisant la différence entre la tension moyenne à 20% et la tension moyenne à 95%. Elle caractérise la sensibilité des matériaux ou des assemblages à l'humidité (Figure 2).

Résultats

Nous avons regroupé dans les Tableaux 1 et 2 toutes les valeurs de ΔT et $V_m T$ de tous les matériaux impliqués dans les collages.

Interprétation des résultats

Etat de contrainte après séchage

Durant le mouillage ou le collage, toutes les contraintes sont relaxées dans les matériaux ou dans les assemblages. La tension atteint son minimum. L'état de contrainte dans de telles conditions est très faible car les propriétés des matériaux ont changé. Ces changements de propriétés sont liés à la présence d'eau.¹¹ En s'introduisant au sein des matériaux l'eau joue un rôle de plastifiant – soit en écartant les fibres et en diminuant les forces de frottement, soit en s'insérant entre les molécules et en affaiblissant les liaisons secondaires. Au séchage le phénomène s'inverse. Durant le départ de l'eau, les matériaux se rigidifient, les modules d'élasticité augmentent et comme les dimensions sont fixes, les contraintes et les tensions se développent. Lorsque l'équilibre entre leur teneur en eau et les conditions hygrométriques sont atteintes, l'état de contrainte à l'intérieur du matériau ou de l'assemblage est à son terme.

En ce qui concerne les collages de RK 17 sur R 2024 et du RK 17 sur C 202, leurs états de tension à l'équilibre se situent entre les valeurs de leur composant. Durant le séchage un rééquilibre des tensions s'effectue en empruntant deux voies. Dans le premier cas les propriétés du R2024 sont très peu affectées par la présence d'eau. Le RK 17 en séchant développe des tensions qui sont en partie absorbées par l'intermédiaire des forces d'adhésion par le R 2024. A l'équilibre, les tensions résiduelles dans l'assemblage sont légèrement inférieures aux tensions du papier.

$$\Delta T_{RK17/R2024} = 2,48 \text{ daN/m} < \Delta T_{RK17} = 2,71 \text{ daN/m}$$

En tant que support de renfort le R 2024 semble temporiser les tensions résiduelles de l'assemblage.

Dans le second cas, le C 202 est très sensible à l'eau. Au séchage le RK 17 et le C 202 vont développer leur propre tension mais comme ils sont liés entre eux par des forces d'adhésion c'est le matériau le plus réactif qui va imposer son comportement à l'autre. C'est ainsi que le C 202 va contraindre le RK 17 et que celui-ci se trouvera en surtension. Ce support multiplie les tensions dans l'assemblage.

Stabilité mécanique aux variations d'humidité

Une fois le séchage accompli, l'assemblage reste plus ou moins réactif à l'humidité. Si on considère le comportement initial du RK17 ($V_m T_{sm} = 7,17 \text{ daN/m}$, $V_m T_s = 8,47 \text{ daN/m}$), la sensibilité à l'eau de l'assemblage RK 17/R 2024 a diminué d'un facteur 1,2 alors que dans le collage RK 17/C 202 elle a augmenté d'un

facteur de 5,5. Autrement dit le RK 17 qui est un papier moyennement réactif donne, associé au C 202 un assemblage très sensible à l'humidité. Cet assemblage devient instable mécaniquement car il sera sollicité aux moindres variations d'humidité environnante.

Nous savons que ce sont des forces élémentaires au sein de la matière qui en s'opposant aux contraintes assurent la cohésion des matériaux et l'adhésion des éléments assemblés. Si l'état de contrainte dans l'assemblage devient trop important, les forces élémentaires peuvent céder et nous voyons apparaître des dégradations.¹²

Etude de l'influence de la mise en oeuvre d'un doublage

Etudions aussi le cas des doublages 1 et 2 sachant qu'ils sont composés des mêmes matériaux mais que seule la mise en oeuvre est différente. Nous avons effectué une simulation du doublage d'un dessin XIXe sur un non-tissé de polyester. Dans l'optique du restaurateur d'art graphique, ce doublage est fait en plusieurs étapes. La première étape consiste à contre-coller au revers du dessin sur papier XIXe un papier japon le RK 19 et simultanément de renforcer le REEMAY 2024 d'un papier japon le RK 17. Enfin le dessin doublé est collé sur le support de renfort. Pour tenter d'éclaircir certaines particularités qui caractérisent le comportement d'un doublage, nous avons choisi d'opérer de deux façons différentes:

- collage du papier XIXe doublé de RK 19 sur le REEMAY 2024 renforcé de RK17 et tendu,
- collage du REEMAY 2024 renforcé de RK17 sur le papier XIXe doublé de RK 19 et tendu.

Pour réaliser ces deux doublages nous avons suivi les protocoles expérimentaux suivants. Dans le premier doublage (doublage 1) nous avons utilisé le REEMAY 2024 renforcé de RK 17. Nous l'avons monté et tendu à 15 daN/m sur le cadre extensiométrique. Conjointement nous avons doublé le papier XIXe de RK 19. L'ensemble a été collé en respectant la procédure définie. Dans le deuxième cas (doublage 2) c'est le papier XIXe doublé de RK 19 que nous avons monté et tendu à 15 daN/m sur le cadre. Le REEMAY renforcé de RK 17 est préparé séparément et collé sur le papier XIXe. Le collage des éléments a été exécuté selon le protocole en vigueur. Les deux doublages ont été exécutés dans les mêmes conditions climatiques: 55% HR et 23°C. Les variations tensions sont enregistrées toutes les 5 minutes durant 25 heures environ. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 3.

En examinant les valeurs de $V_m T$, nous constatons que leurs réactivités varient dans une fourchette de 31 à 38 daN/m. La sensibilité à l'eau de ces doublages est moins importante que celle du papier XIXe représentant le dessin. Dans les deux cas nous gagnons en stabilité vis à vis de l'humidité.

Pendant si leur sensibilité est du même ordre de grandeur, leur comportement à l'humidité est bien différent. Comparons pour justifier notre propos les courbes d'évolution des tensions aux humidités relatives 20% et 95% en sens travers des deux doublages conditionnés auparavant à 55% H.R. (Figure 3).

Le décalage des courbes représente la différence de comportement. Le doublage 1 est beaucoup plus sensible au climat sec puisque à 20% il est dans un état de surtension alors que le doublage 2 est peu tendu. Par contre à 95% le doublage 1 est très relaxé.

Conclusion

La durée de vie des matériaux et des assemblages peut se définir comme la période pendant laquelle les matériaux constitutifs de l'oeuvre restent capables d'assurer les fonctions pour lesquelles ils sont prévus. Dans le domaine des arts graphiques nous pouvons considérer que le papier, support structurel de l'expression esthétique, en se dégradant ne joue plus son rôle. Sa durée de vie est donc limitée. D'autre part la nature est faite de telle manière que la bonne conservation d'un objet dépend de l'état d'équilibre entre les forces de cohésion et d'adhérence des matériaux et les contraintes qui s'y exercent. Si les contraintes dans l'oeuvre deviennent trop

Tableau 3. Valeurs de la réactivité à l'humidité du papier XIXe et des doublages

	Sens machine	Sens travers
	(sm) $V_m T_{sm}$ (daN/m)	(st) $V_m T_{st}$ (daN/m)
Papier XIXe siècle	48,71	55,99
Doublage 1	131,29	37,26
Doublage 2	/	34,33

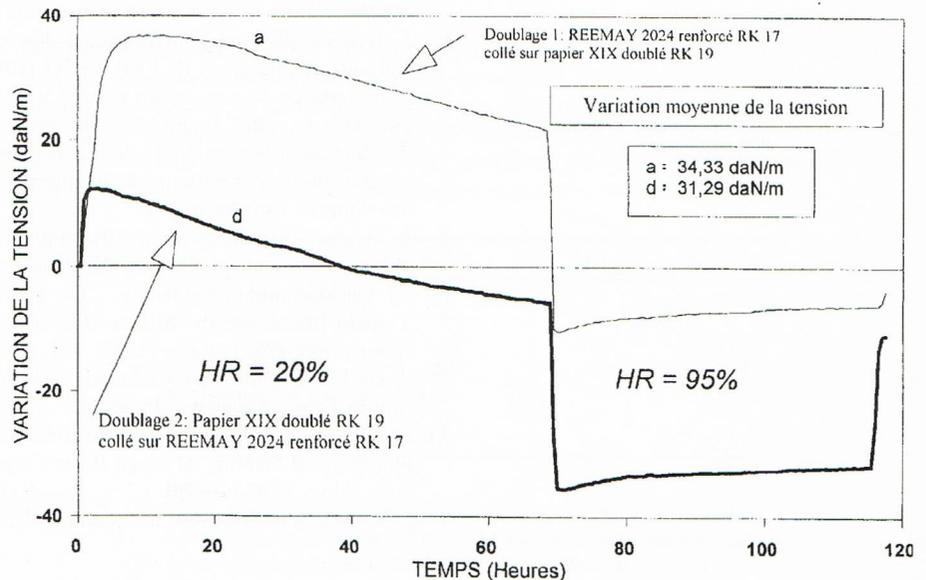


Figure 3. Courbes de la variation des tensions dans le sens travers des doublages 1 et 2 à 20% et 95% d'humidité relative après un conditionnement à 55% HR.

importantes les forces de cohésion ou d'adhérence viennent à céder et nous observons la formation d'altérations. Par conséquent pour conserver au mieux un dessin nous devons le maintenir dans un état minimum de contraintes et lui assurer la meilleure stabilité mécanique aux variations hygrométriques.

En reprenant les résultats obtenus dans cette étude, nous voyons par rapport au comportement des papiers, qu'un assemblage ou doublage de papier sur un polyester réduit l'état de contraintes et améliore la stabilité mécanique. Même si ces résultats sont issus de simulations, ils restent significatifs si l'on considère les équilibres mécaniques au sein des matériaux.

Remerciements

Cette étude a pu être réalisée dans le cadre du Service de Restauration des Musées de France, grâce à des crédits de recherche du Ministère de la Culture et à la bienveillance de Mesdames France Dijoud et Nathalie Volle, Chefs du SRMF. Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance envers Madame M.C. Enschaijan pour sa participation à cette étude et à remercier Monsieur G. Villoutreix qui a eu la gentillesse de nous accueillir dans son laboratoire au CNAM. Nous remercions également Monsieur Lepape, Ingénieur au Bureau Véritas qui nous a aidé à réaliser le cadre extensiométrique.

Fournisseurs

Papier japon RK 17 et RK 19: ATLANTIS, 26 rue des petits champs 75002 Paris, France.
Papier XIX: Musée d'Angers, France.

CEREX 202: ATLANTIS, 26 rue des petits champs 75002 Paris, France.

REEMAY 2024: NORDLYS, 17 rue Emile-Hié 59270 Bailleul, France.

Notes et Références

1. J.C.Green, "Expansivity and Dimensional Stability", *Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*, 2 (1984) 415-443.
2. G. Hedley, "Relative Humidity and Stress/Strain Response of Canvas Painting, Uniaxial Measurements of Naturally Aged Samples" *Studies in Conservation*, 33 (1988) 133-148.
3. W.H. Russell and G.A Berger, "The Behavior of Canvas as a Structural Support for Painting. Preliminary report", *Science and Technology in the Service of Conservation*, IIC London 1982, 139.
4. M.F. Mecklenberg and C.S Tunmosa, "Mechanical Behavior of Paintings subjected to Changes in Temperature and Relative Humidity", *Art in Transit Studies in Transport of Painting*, ed. M.F.Mecklenberg.

5. G. Hedley, "The Stiffness of Lining Fabrics: Theoretical and Practical Considerations", ICOM Committee for Conservation 6th Triennial Meeting 1981, 81/2/2.
6. A. Roche, "Rentoilage traditionnel-désentoilage: Analyse des tensions", Actes du 4ème colloque international de l'ARAAFU (1995) 103-108.
7. Dans cette étude nous avons mesuré les contraintes qui se développent au séchage dans une série de colles. Parmi ces colles nous avons constaté que le mélange de PLEXTOL B 500 et de carboxyméthyl cellulose développe des tensions de l'ordre de 0,3 daN/m. Ces résultats nous permettent de négliger ces tensions si on les compare aux tensions développées dans les papiers.
8. A. Roche, "Comportement mécanique des colles", *Hedley Memorial Forum, Mechanical Behaviour of Paintings*, Ottawa (1993) non publié.
9. S.J. Hackney and G.A. Hedley, "The Deterioration of Linen Canvas: Accelerated Aging. Tests to Investigate the Modes of Deterioration", *Science and Technology in the Service of Conservation*, IIC London (1982) 151.
10. P. Goddard, "Humidity Chambers and their Application to the Treatment of Deformation in Fabric Supported Painting.
11. I. Nielsen and D. Priest, "The Influence of Lining and Drying Methods on the Dimensional Stability of Lined Paper Objects", *Lining and Backing*, The UKIC Conference, Nov. 1995, 65-71.
12. J. Verdu, "Vieillessement des plastiques" AFNOR Technique, ed. Eyrolles.

Annexe

REEMAY 2024

Le REEMAY 2024 est un non-tissé "spunbond" à base de polyester type poly(théréphtalate d'éthyle) -PETP-. Dans le PETP, des groupes polaires tels que -COO- sont associés aux chaînons hydrocarbonés -CH₂-CH₂, hydrophobes. Globalement la reprise d'eau de ces matériaux est très faible. Les principales propriétés du REEMAY 2024 sont regroupées dans le tableau suivant.

	REEMAY 2024
Masse surfacique, (g/m ²)	70
Charge maximale avant rupture* (daN/m)	
Travers	230
Machine	340
Allongement au mouillage (%)	
Travers	0
Machine	0

Références:

* Les essais de résistance à la rupture des non-tissés ont été réalisés sur un appareil de traction INSTRON 4507 dans le laboratoire de mécanique des plastiques du Conservatoire National des Arts et Métiers.

CEREX 202

Le CEREX est un non-tissé "spunbond" à base de polyamide PA. La présence de nombreux groupes polaires CO-NH, rend les polyamides sensibles à l'eau. Ils reprennent dans des conditions normales une humidité de 2,5% et à saturation elle peut atteindre 8,5%. Cette reprise d'eau altère ses propriétés mécaniques et sa stabilité dimensionnelle. Dans des conditions normales d'utilisation les polyamides ont une excellente résistance à la fatigue et au frottement. L'ensemble des caractéristiques physiques du CEREX 202 est regroupé dans le tableau suivant.

	CEREX 202
Masse surfacique (g/m ²)	71
Charge maximale avant rupture (daN/m) *:	
Travers	256
Machine	574
Allongement au mouillage (%) **::	
Travers	3,25
Machine	3

Références:

* Les essais de résistance à la rupture des non-tissés ont été réalisés sur un appareil de traction INSTRON 4507 dans le laboratoire de mécanique des plastiques du Conservatoire National des Arts et Métiers.

** Rapport d'étude, Marie Christine Enshaian.

RK17, RK19 et papier XIX

Les papiers japon RK 17 et RK 19 sont fabriqués à partir du KUSO ou MURIER A PAPIER. Les fibres extraites contiennent 66% à 67% de cellulose et d'hémicellulose. La longueur des fibres varie de 5 à 10 mm. Nous n'avons pas d'informations précises sur la nature et la fabrication du papier XIX sur lequel LENEPVEU avait fait l'esquisse du plafond de l'Opéra de Paris. Les échantillons, que nous avons recueilli, sont probablement imprégnés d'un fixatif. Les propriétés physiques des trois papiers sont regroupées dans le tableau suivant.

	RK17	RK19	Papier XIX
Masse surfacique (g/m ²)	18	30	160
Charge maximale (daN/m)	**	**	*
Machine:	106	199	539
Travers:	89	178	214
Allongement au mouillage (%)	**	**	***
Machine:	0	0	1
Travers:	0,3	0,2	2,25

Références:

* Les essais de résistance à la rupture du papier XIX ont été réalisés sur un appareil de traction INSTRON 4507 dans le laboratoire de mécanique des plastiques du Conservatoire National des Arts et Métiers,

** Référence: N.Nicholson, S Page, Machine made oriental papers in western paper conservation 1988, Conservation laboratory NNPD National Archives Washington DC.

*** Rapport d'étude M.C.Enshaian.