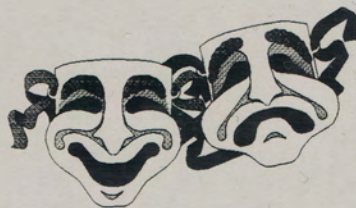


Avertissement: Ces documents n'ont pas fait l'objet de vérifications.
Des erreurs ont pu se glisser.
N'oublions pas que l'état des connaissances à cette époque
n'avait pas le même niveau qu'actuellement.

ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES DESSINS GRANDS FORMATS DOUBLES SUR DES MATERIAUX NON-TISSES



Ce document a été revu et publié voir bibliographie LARCROA
14-ROCHE Alain. «Etude du comportement mécanique des
dessins grands format doublés sur des matériaux non-tissés»
Acte de la 11ème Réunion Triennale de l'ICOM CC Edimbourg, p.545, 551. (1996).

Etude réalisée par Alain ROCHE
Janvier 1994

RESUME

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 REMMAY 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 violentes variations hygrométriques.

MOTS CLEFS

Assemblage- Collage- Contrainte- Dessin- Doublage- Durée de vie- Mouillage- Non-tissé- Papier- Renfort- Séchage- Stabilité- Tension

ROCHE Alain 07 rue du disque 75013 PARIS Tél.45 84 34 82

Restaurateur diplômé de l'IFROA

Ancien pensionnaire de la Villa Médici

Ingénieur CNAM

Travaille actuellement comme restaurateur de tableaux au service de restauration de la DMF

Chargé de cours à la MST de conservation et restauration des biens culturels

Enseignant à l'école des beaux arts d'Avignon.

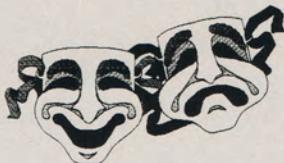


TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1 ASPECT THEORIQUE	3
2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL	5
3 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	7
3.1 Les non-tissés, généralités	7
3.1.1 REEMAY 2024	8
3.1.2 CEREX 202	9
3.2 Les papiers, généralités	11
3.2.1 RK 17, RK 19	11
3.2.2 Papier XIX	12
3.3 Adhésifs: mélange de PLEXTOL B 500/ CMC et CMC	13
3.3.1 Nature de l'adhésif	13
3.3.2 Séchage de l'adhésif	13
4 ETUDE DES MATERIAUX	15
4.1 Comportement à l'eau et à l'encollage	15
4.1.1 REEMAY 2024	16
4.1.2 CEREX 202	17
4.1.3 RK 17	18
4.1.4 RK 19	19
4.1.5 Papier XIX	20
4.1.6 Remarques	21
4.2 Comportement des matériaux aux variations de l'humidité (20% --> 90%)	22
4.2.1 Variation moyenne de la tension dans le sens machine	24
4.2.2 Variation moyenne de la tension dans le sens travers	25
4.2.3 Anisotropie	26
5.ETUDE DES COLLAGES	27
5.1 Origine des tensions dans le collage de deux feuilles	28
5.2 Evolution des tensions durant le séchage du collage	31
5.2.1 RK 17 sur REEMAY 2024	32
5.2.2. RK 17 sur CEREX 202	33
5.2.3 RK 19 sur papier XIX	34
5.2.4 Interprétation des résultats	35
5.3 Influence de la mise en oeuvre d'un doublage	36
5.4 Analyse des résultats	40
5.5 Comportement des collages aux variations de l'humidité (20% -->90%)	41
5.5.1 RK 17 sur REEMAY 2024 et RK 17 sur CEREX 202	42
5.5.2 Doublage 1 et 2	44
CONCLUSION	46

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 de plusieurs phénomènes, le vieillissement chimique, la fatigue mécanique. Dans un dessin de grand format sa propre masse provoque des sollicitations mécaniques susceptibles d'entraîner au cours du temps des altérations du papier.

Rappelons que la nature et les propriétés du papier ne sont pas prévues, du point de vue mécanique, pour jouer un rôle de support dans l'élaboration de dessins et peintures de grand format.

Pour assurer la stabilité mécanique et dimensionnelle d'un dessin dégradé de grandes dimensions, le restaurateur dispose des techniques de doublage. Nous appelons "doublage" le contre-collage d'un support de renfort au revers de l'oeuvre. Les techniques de doublage sont les suivantes;

- Doublage traditionnel sur papier
- Doublage sur toile de fibres naturelles
- Doublage sur non-tissé de fibres synthétiques.

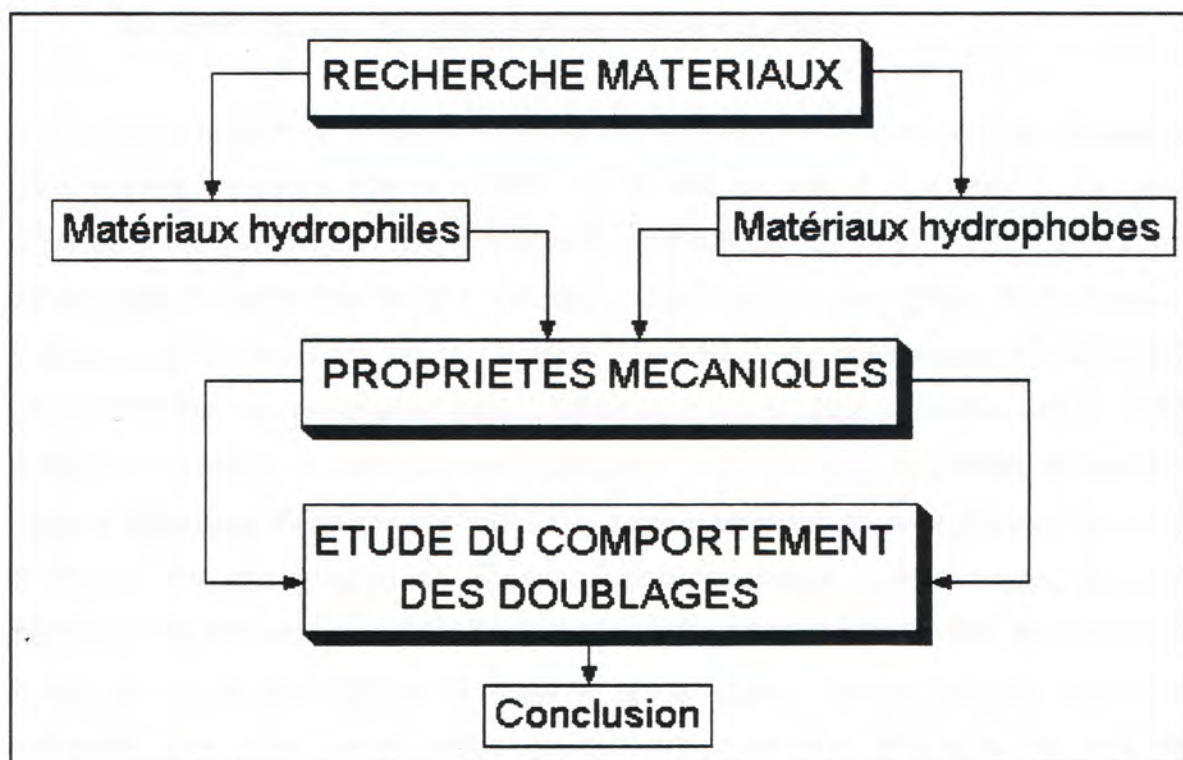
Dans un doublage sur toile de fibres naturelles les dégradations provoquées par les différences de comportement entre le papier et la toile lors sollicitations externes ont amené les restaurateurs à rechercher des matériaux de substitution. Ces matériaux doivent apporter au papier, le complément de résistance 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 intéressés avant tout au comportement mécanique des doublages.

J'ai souhaité dans cette étude développer une méthode d'analyse qui permet une plus large réflexion sur le choix et l'utilisation des matériaux de renfort en fonction des matériaux originaux. Le protocole expérimental est basé sur des simulations d'opération de restauration qui s'écartent formellement des essais normalisés en vigueur dans le domaine de la recherche appliquée. Une telle démarche pose naturellement des difficultés dans l'interprétation des résultats. Cette approche personnelle, que j'exploite depuis 1989, a pour but de mettre en évidence les phénomènes et les mécanismes qui se développent dans une situation expérimentale proche de la pratique.

Les résultats de la recherche des matériaux de renfort qui répondent aux critères nous amènent à considérer deux types de non-tissés: les non-tissés hydrophiles et hydrophobes.

Ainsi cette étude s'articulera autour des trois points illustrés par le diagramme figure (1):



F i g u r e 2 : O r g a n i g r a m m e

1 ASPECT THEORIQUE

L'approche du comportement mécanique des dessins doublés ou non se révèle délicate si nous utilisons l'instrumentation scientifique traditionnelle. Le matériel classique n'est pas adapté car les résultats obtenus sont rarement le reflet de la réalité.

Par conséquent cette étude est élaborée à partir d'un dispositif instrumental qui a été conçue spécialement pour l'analyse du comportement mécanique des peintures, des dessins et de leurs composants et des simulations de certaines opérations de restauration.

L'analyse des résultats obtenus et les conclusions tirées sont fondées sur certains concepts que nous allons introduire.

"La durée de vie des matériaux et des assemblages."

Cette notion ne concerne pas seulement les produits, matériaux, matériels utilisés dans l'industrie. Elle se justifie vis à vis des oeuvres d'art à partir du moment où nous considérons que chaque élément constitutif de l'oeuvre assure une fonction structurelle ou esthétique et que l'oeuvre se réduit à un assemblage de matériaux. Bien que cette vision soit très réductrice, elle permet au scientifique d'aborder les problèmes qu'il se pose avec plus d'objectivité. Ainsi nous pouvons définir cette notion comme étant **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. A l'inverse des produits industriels que l'on remplace lorsqu'ils sont hors usage, nous devons prolonger par différents moyens de conservation restauration la vie du dessin.

"Etat de contraintes minimum"

Une intervention de restauration se base sur les "**règles d'éthique générale et principes déontologiques des interventions de Conservation-restauration**". L'intervention doit respecter les critères suivants; innocuité, compatibilité, réversibilité, stabilité. La durée de vie de l'oeuvre restaurée dépend de la stabilité chimique des matériaux de restauration utilisés mais aussi de la stabilité mécanique du traitement. Cette stabilité mécanique est liée par des relations phénoménologiques au concept suivant: **lorsqu'un matériau ou un assemblage se trouve dans un ETAT DE CONTRAINTES MINIMUM, leur sensibilité aux agressions est diminuée.** *Par conséquent nous pouvons prévoir que la durée de vie de l'oeuvre restaurée sera améliorée.*

Ce sont ces concepts qui nous aideront à interpréter les résultats d'expérience dans un esprit strictement lié à la conservation restauration.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Ce dispositif est constitué d'un cadre extensiométrique, d'une enceinte climatique et d'une sonde Thermo hygrométrique. Le cadre extensiométrique a été conçu spécialement pour étudier le comportement mécanique biaxial des matériaux tendus dans différentes conditions expérimentales.

Le cadre extensiométrique est composé, figure (3):

- d'un cadre métallique carré équipé de capteurs,
- d'un système informatique d'enregistrement des données
- d'un système informatique de traitement des données.

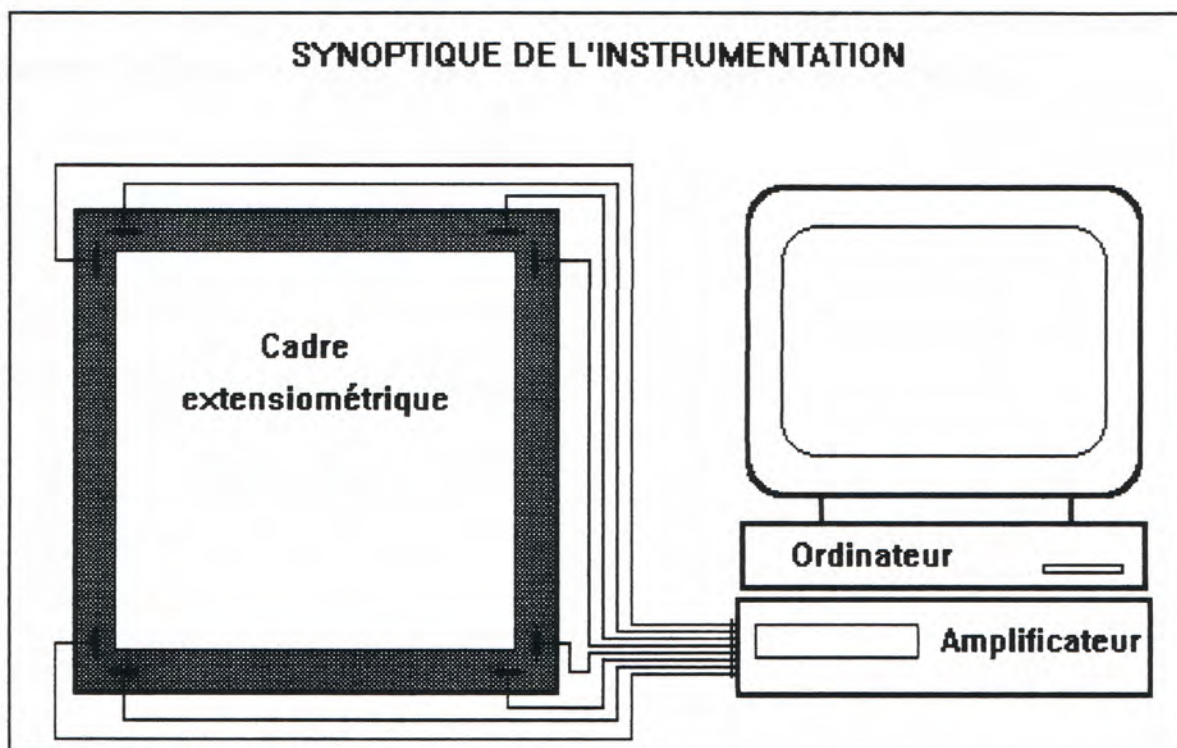


Figure 3: Synoptique de l'instrumentation

Sa précision est de $\pm 0,1$ daN/m pour des tensions supérieures à 0,3 daN/m. Au-dessous de cette valeur la sensibilité du cadre est insuffisante. La dimension des montants du cadre est de 0,80 m, ce qui permet de tendre une membrane de 0,64 m²

Une contrainte s'exprime par:

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

F: Force

S: surface de la section

Une augmentation de la contrainte au sein des matériaux tendus se manifeste par une force ou tension qui se transmet aux capteurs via les montants du cadre extensiométrique. Dans ce dispositif les efforts sont transmis dans les mêmes conditions que l'on rencontre dans différentes opérations de restauration.

3 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

3.1 Les non-tissés, généralités

L'Association des fabricants Européens des Non-Tissés (EDANA), propose de considérer comme non-tissés *"tout produit manufacturé constitué d'un voile, d'une nappe ou d'un matelas de fibres quelles qu'elles soient, réparties directionnellement ou au hasard et dont la cohésion interne est assurée par des méthodes mécaniques, physiques ou chimiques ou par combinaison de ces procédés à l'exclusion du tissage, du tricotage de la couture et du feutrage traditionnel"*.

La fabrication des non-tissés se déroule en 3 étapes

- * formation de la nappe ou du voile
- * consolidation de cette nappe
- * ennoblissement du produit pour obtenir un produit fini.

La formation d'une nappe par voie fondue ou "spunbond" est obtenue à partir des filaments du polymère fondu sortant des filières de l'extrudeuse et plaqués en nappe à l'aide d'un dispositif pneumatique.

L'interpénétration des filaments en fusion assure au refroidissement des points de liaison qui sont à l'origine des propriétés mécaniques du non-tissé.

Un produit de finition permet de modifier l'aspect et les propriétés de surface du textile.

3.1.1 REEMAY 2024

Le REEMAY 2024 est un non-tissé "spunbond" à base de polyester. Les polyesters thermoplastiques (linéaire) résultent de la condensation d'acide téréphtalique avec différents diols ex:

Acide téréphtalate + éthylène glycol \rightarrow PETP poly(téréphtalate d'éthyle),
figure (3)

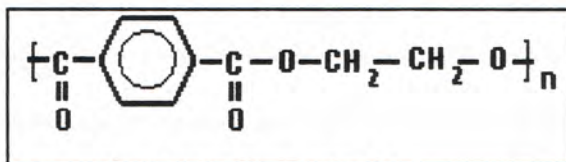


Figure 4: Molécule de PETP

Le PETP peut se trouver à l'état amorphe (film de MYLAR, de MELINEX) ou partiellement cristallin. Par étirage le PETP se trouve à l'état cristallin et orienté. Dans cet état il offre une excellente résistance en traction et au déchirement. Les non-tissés de polyester spunbonded sont fabriqués à partir de l'extrusion étirage du PETP et soudage à chaud des fils étirés. L'absorption en eau est essentiellement liée à la présence de groupes polaires. Dans le PETP, des groupes polaires tels que $-\text{COO}-$ sont associés aux chaînons hydrocarbonés $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$, hydrophobes. Globalement la reprise d'eau de ces matériaux est faible.

9 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

Les principales propriétés sont regroupées dans le tableau 1.

TABLEAU 1

	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

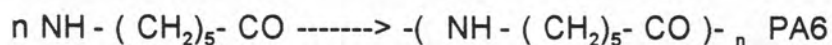
Références:

* Les essais de résistance à la rupture des non-tissés ont été réalisés sur un appareil de traction INSTROM 4507 dans le laboratoire de mécanique des plastiques du Conservatoire National des Arts et Métiers. Les procès verbaux des essais de chaque échantillon sont présentés en annexe avec la courbe moyenne de traction.

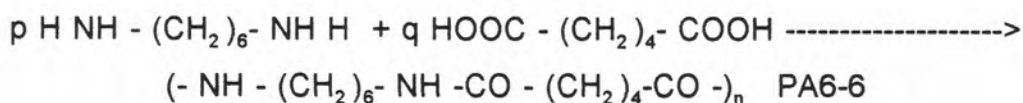
3.1.2 CEREX 202

Le CEREX est un non-tissé "spunbond" à base de polyamide PA. Les polyamides sont obtenus:

- Par polyaddition d'un monomère. Le PA6 est préparé par polyaddition du caprolactame.



- Par polycondensation d'une diamine et d'un diacide. Le PA6-6 est produit par la polycondensation de l'hexaméthylène diamine et de l'acide adipique.



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 est regroupé dans le tableau 2

TABLEAU 2

	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 INSTROM 4507 dans le laboratoire de mécanique des plastiques du Conservatoire National des Arts et Métiers. Les procès verbaux des essais de chaque échantillon sont présentés en annexe avec la courbe moyenne de traction.

** Rapport d'étude, Marie Christine Enshaian.

Remarque: Les valeurs moyennes calculées par l'appareil de traction sont en daN et la largeur de l'éprouvette est de 25 mm. Dans le tableau ci-dessus les valeurs de la charge maximale sont transformées en daN/m.

3.2 Les papiers, généralités

Matière à base de cellulose faite de fibres végétales naturelles réduites en pâte que l'on étend et sèche pour former une feuille mince.

3.2.1 RK17, RK19

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.

La méthode de fabrication des papiers japon RK17 et RK19 se déroule en plusieurs étapes:

Préparation des fibres: Les branches de mûrier sont coupées et rassemblées en fagots. Elles sont placées ensuite dans une étuve pendant environ deux heures de manière à ramollir l'écorce. On sépare l'écorce du bois. L'écorce présente un épiderme extérieur noir et le liber partie intérieure blanche. Le grattage permet de séparer l'épiderme du liber. La cuisson en milieu alcalin a pour objet l'élimination des matières non cellulosiques (Lignine, pectine, gommés). Les produits alcalins utilisés sont les cendres de bois et de nos jours la chaux ou la soude caustique. Après la cuisson les fibres sont rincées abondamment à l'eau. La dernière opération consiste à défibrer les fibres par battage¹.

Préparation de la pâte à papier: Les fibres préparées sont malaxées à l'eau avec le mucilage dans une pile type "hollandaise".

Formation de la feuille: La pâte à papier venant des piles passe dans une grande cuve en ciment le cuvier. Ensuite la pâte est dirigée vers la machine à papier sur laquelle la feuille se forme.

¹: Marie Christine Enshaian mémoire IFROA.1984, "Les papiers japonais utilisés pour les doublages de dessins"

3.2.2 Papier XIX

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 3.

TABLEAU 3

	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

Référence:

*Les essais de résistance à la rupture du papier XIX ont été réalisés sur un appareil de traction INSTROM 4507 dans le laboratoire de mécanique des plastiques du Conservatoire National des Arts et Métiers, (voir procès verbaux en annexe).

** 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

3.3 Adhésifs mélange de PLEXTOL B 500 / CMC et CMC.

Le mélange de PLEXTOL B 500 / CMC a été étudié dans le cadre plus général des colles.²

3.3.1 Nature de l'adhésif

Le Plextol B 500 est une marque déposée d'un ester acrylique fabriqué par Rohm. Cet ester acrylique est à base de poly(acrylate d'éthyle) sous forme d'émulsion. Cette émulsion contient 50% d'extrait sec. Le film a une masse volumique de 1,08 g/cm³.

Du point de vue mécanique, le film a un module d'élasticité $E_{20^{\circ}\text{C}} = 364 \text{ MPa}$, une résistance à la rupture de 7,5 MPa et une déformation à la rupture de 600%. La température de transition vitreuse T_g est de 9°C.

La carboxyméthyle cellulose (CMC) est un polyélectrolyte de haut poids moléculaire hydrosoluble. Elle possède un pouvoir épaississant. Mélangée au Plextol B 500 elle lui donne une consistance pâteuse. Le film de CMC est relativement rigide. Elle est utilisée comme adhésif dans les doublages des papiers.

3.3.2 Séchage de l'adhésif.

Nous avons envisagé de mesurer les tensions provoquées par le séchage du PLEXTOL B 500 et d'un mélange de PLEXTOL B 500 et CMC de manière à observer l'effet que produit l'introduction d'un agent épaississant sur le comportement du PLEXTOL B 500.

² Alain ROCHE, Forum G. HEDLEY OTTAWA 1993 : "Approche du comportement mécanique du séchage des colles"

Le mélange est composé de 50% de PLEXTOL B 500 et de 50% de CMC à 5% dans l'eau. Le film de colle sec contient 90% de PLEXTOL B 500 et 10% de CMC, figure (5)

Remarque: les courbes en annexe sont plus lisibles

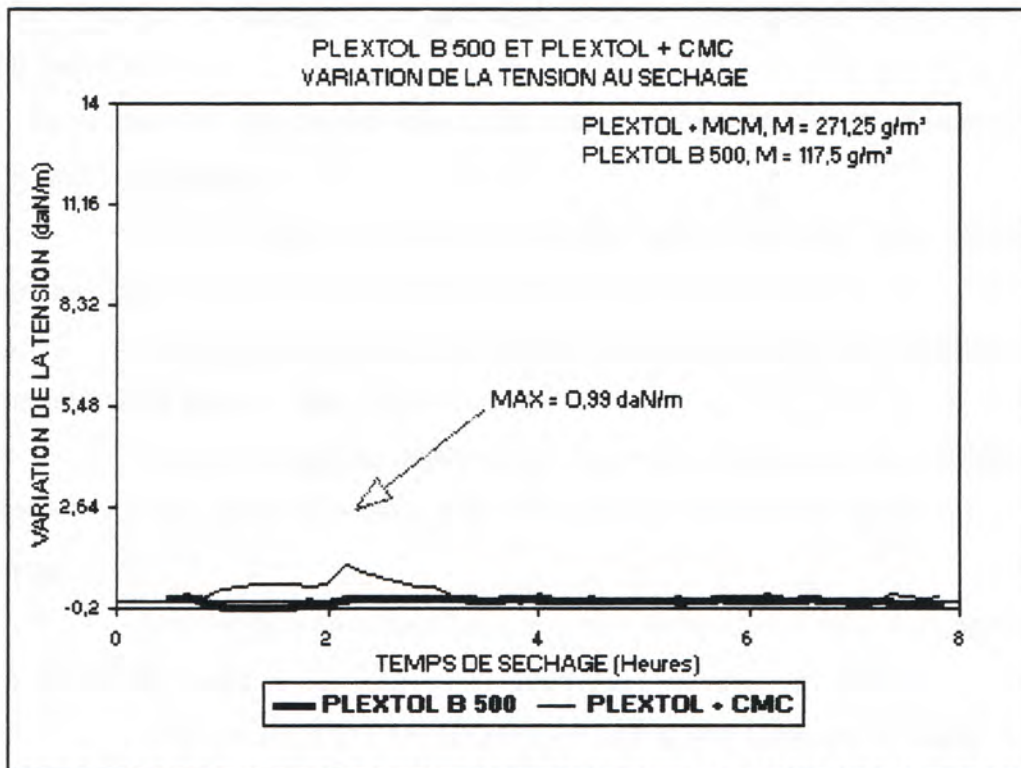


Figure 5: Séchage du PLEXTOL B 500 et du PLEXTOL B 500 / CMC

Les courbes de la figure (5) font apparaître une tension maximum au séchage d'environ 1 daN/m pour le mélange PLEXTOL B 500 + CMC suivi d'une relaxation de la tension. Aucune tension supérieure à 0,3 daN/m ne se manifeste durant le séchage du PLEXTOL B 500.

Les résultats montrent qu'un mélange de PLEXTOL B 500 / CMC n'est pas responsable des tensions durant le séchage des assemblages. Cette remarque n'est pas valable pour les colles de peau et les gélatines.

4 ETUDE DES MATERIAUX

4.1 Comportement à l'eau et à l'encollage ΔT

Comme dans toutes les opérations de doublage l'ensemble des matériaux subit au moins un mouillage et un séchage, il est fort intéressant d'en connaître le comportement.

La procédure, qui permet de suivre les variations de tension des matériaux tendus, est la suivante:

- Avant chaque série de mesures nous faisons le zéro de chaque capteur au repos à l'aide des potentiomètres.
- Le non-tissé ou le papier est monté sur le cadre en respectant les sens machine et travers par rapport au cadre.
- Nous appliquons une tension moyenne qui dépend du matériau. La tension initiale est proportionnelle à la tension à la rupture du matériau, elle est d'environ 10%.
- L'enregistrement des tensions est déclenché à raison d'une mesure toutes les 5 minutes.
- L'eau ou la colle est appliquée sur le non tissé ou le papier à l'aide d'un pinceau.
- L'enregistrement est arrêté après 24 heures de séchage.
- Les données sont traitées de manière à pouvoir tracer les courbes de la variation des tensions en fonction du temps de séchage dans les sens travers et machine. Le début des courbes est calé sur le zéro pour éliminer l'influence de la tension initiale. Par rapport aux tensions initiales **les valeurs positives correspondent à une croissance des tensions alors que les valeurs négatives coïncident avec une décroissance des tensions du matériau.**

4.1.1 REEMAY 2024

La courbe de la figure(6) montre l'évolution des tensions du REEMAY 2024 durant l'opération d'encollage. La colle choisie est un PLEXTOL B 500 dilué dans l'eau (1v. pour 3v.d'eau) .

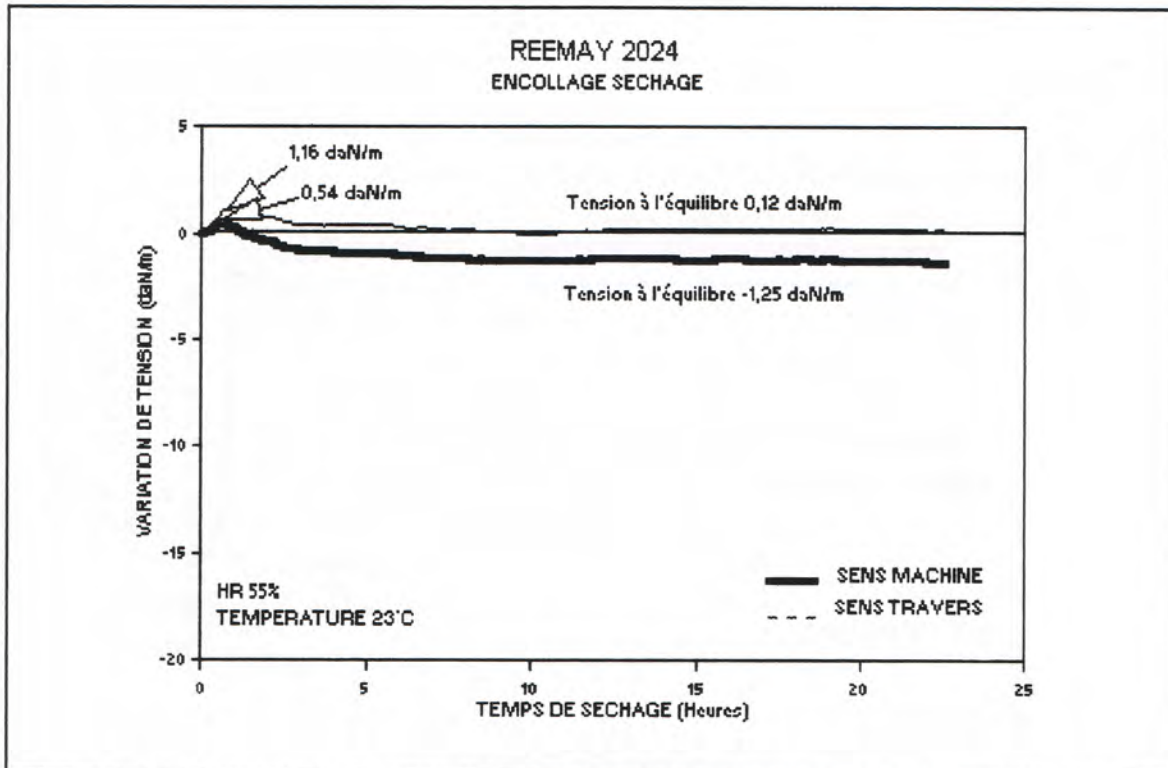


Figure 6 : Variation des tensions du REEMAY 2024 durant l'encollage et le séchage

Dès que le non-tissé est imprégné de PLEXTOL B 500 la tension s'élève légèrement, (0,54 daN/m sens machine et 1,16 daN/m sens travers) Ces tensions maximum sont atteintes respectivement en 1/2 heure et en 1 heure. Ce phénomène de tension pourrait être dû à un léger gonflement des fibres et des produits de finition.

Très rapidement la tension diminue dans les deux sens pour se stabiliser à la fin du séchage (-1,25 daN/m sens machine SM et 0,12 daN/m sens travers ST). Le sens machine s'est légèrement détendu par rapport à la tension initiale alors que le sens travers retrouve sa tension initiale. L'écart de tension maximum enregistré est de 1,79 daN/m SM et 1,04 daN/m ST..

4.1.2 CEREX 202

Les courbes de la figure (7) permettent de suivre l'évolution des tensions pendant l'encollage du CEREX. L'opération s'est déroulée dans les mêmes conditions que pour le REEMAY.

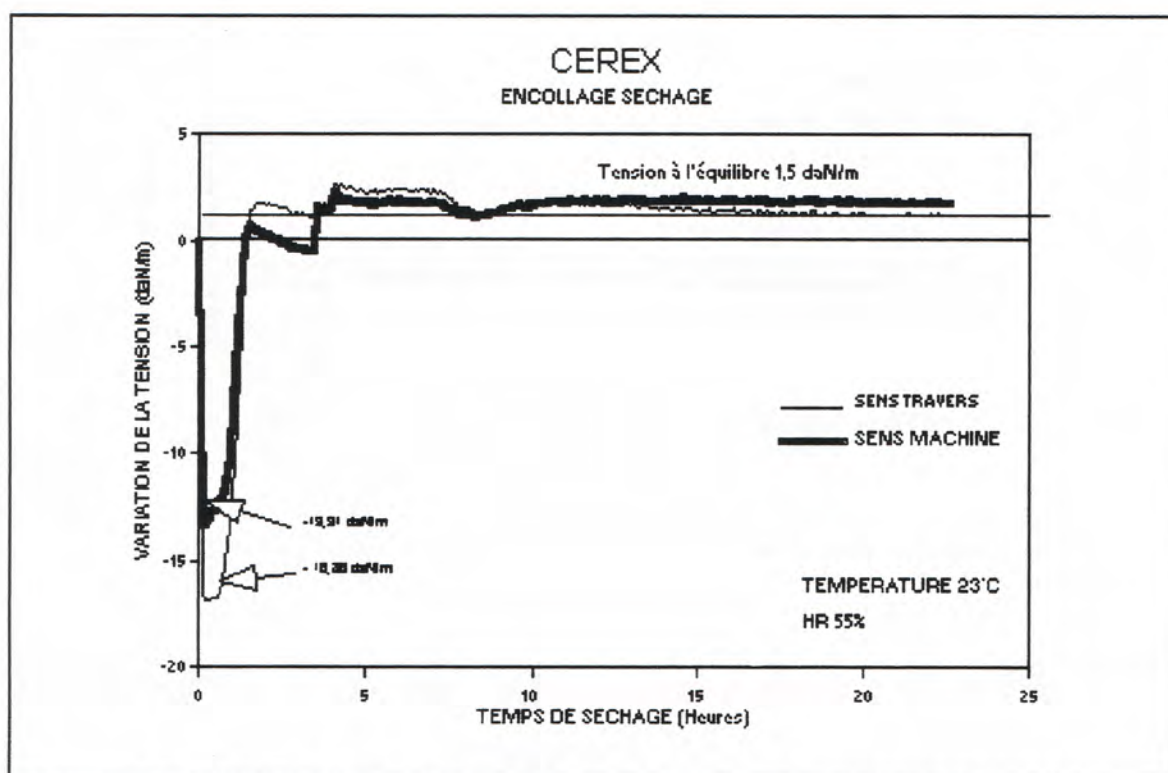


Figure 7: Variation des tensions du CEREX 202 durant l'encollage et le séchage

En contact avec la colle aqueuse, le CEREX subit une détension très importante (-13,31 daN/m SM et -16,86 daN/m ST). La nature hydrophile des polyamides est responsable de ce comportement. La chute de tension est très rapide, les valeurs minimum sont atteintes respectivement en 10 et 5 minutes. Lorsque le séchage commence, les tensions augmentent pour se stabiliser à une valeur de *surtension* en sens machine et sens travers d'environ 1,5 daN/m. L'écart maximum enregistré durant cette opération d'encollage est de 14,81 daN/m SM et de 18,36 daN/m ST.

4.1.3 RK 17

Les courbes de la figure (8) représentent l'évolution des tensions du papier japon RK17 durant le mouillage et le séchage de celui-ci.

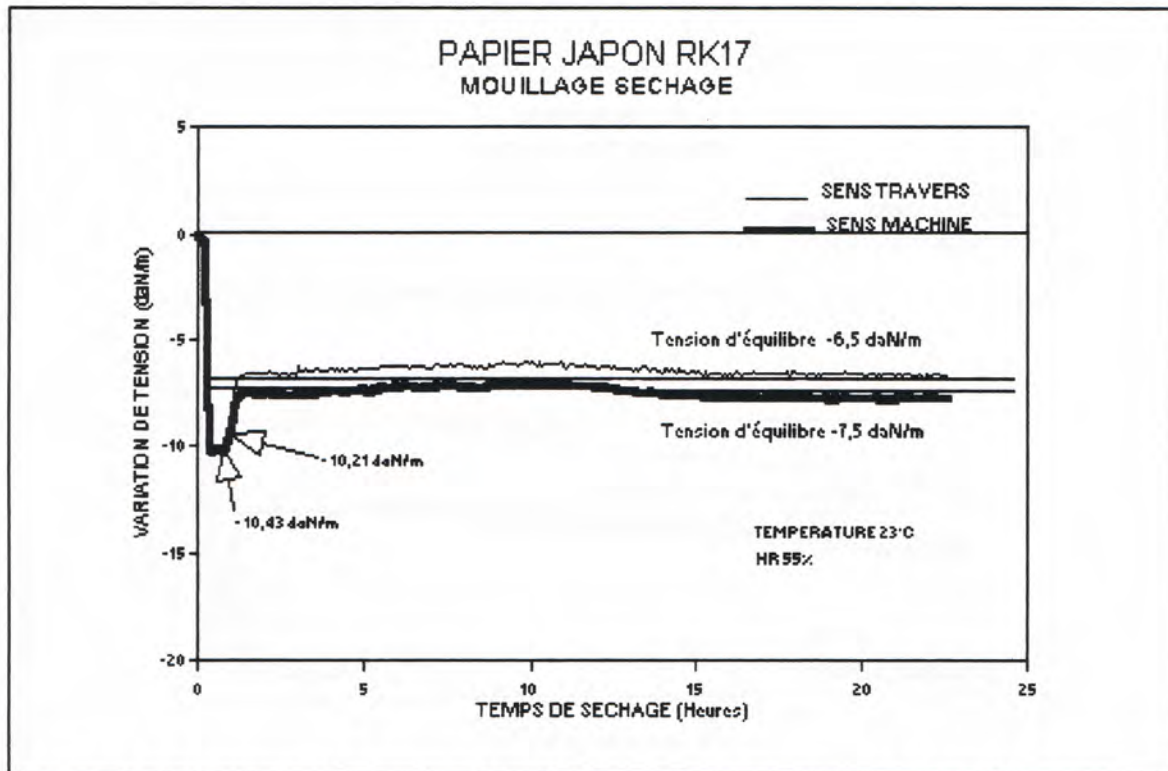


Figure 8 : Variation des tensions du RK 17 durant le mouillage et le séchage

Le mouillage du papier japon RK 17 entraîne une chute des tensions (-10,21 daN/m SM et -10,43 daN/m ST). L'absorption d'eau par la cellulose est responsable de cette perte de tension. Pendant le séchage nous observons un accroissement des tensions qui se stabilisent respectivement à - 7,5 daN/m dans le sens machine et à - 6,5 daN/m dans le sens travers. Le papier se trouve détendu. Les écarts maximum enregistrés sont de 10,21 daN/m SM et 10,42 daN/m ST. Le mouillage du papier entraîne une relaxation des tensions qui se sont accumulées durant la fabrication. Les taux de relaxation sont de $T_{SM} = 73,45\%$ et $T_{ST} = 62,32\%$. Ce taux est le rapport entre la valeur de la tension après séchage et la valeur de la tension au séchage. **Le taux de relaxation représente la quantité de contrainte libérée au premier mouillage.**

4.1.4 RK 19

Les courbes de la figure (9) présentent l'évolution des tensions du papier japon RK 19 pendant le mouillage. Ce papier se différencie du RK 17 par sa masse surfacique, il est plus épais.

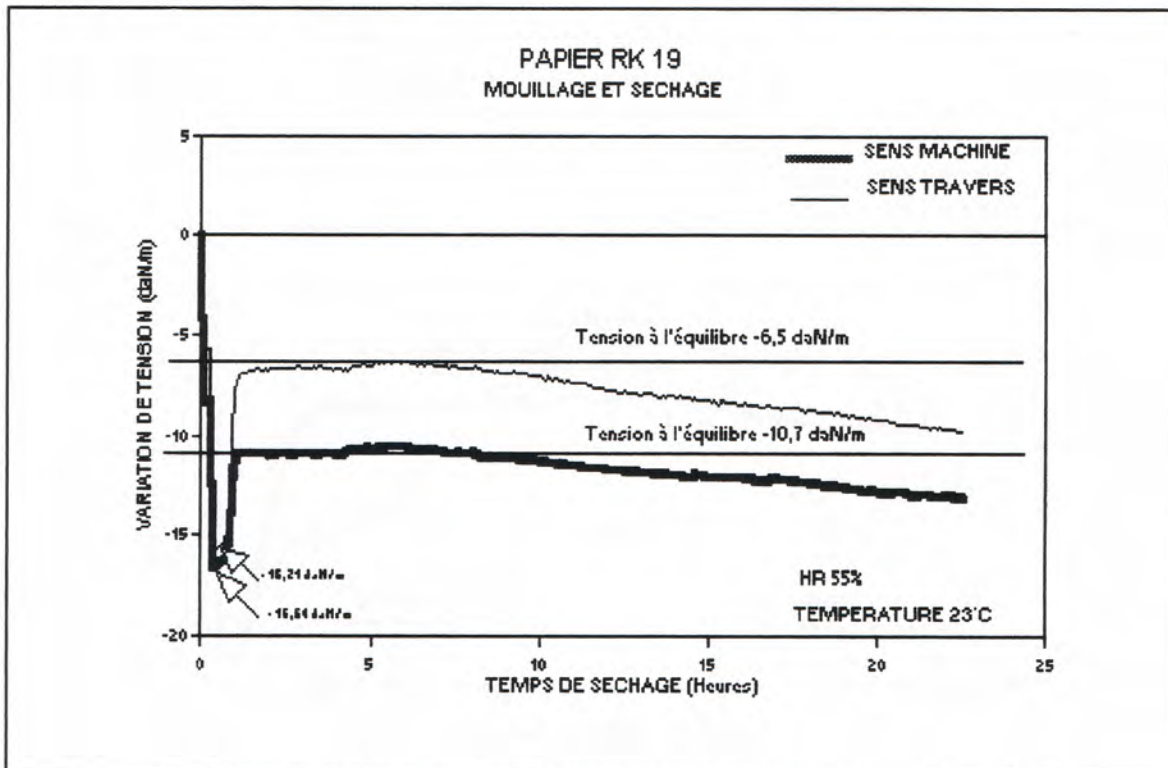


Figure 9 : Variation des tensions du RK 19 durant le mouillage et le séchage .

Au mouillage les tensions décroissent ($-16,64$ daN/m SM et $-16,21$ daN/m ST), puis s'élèvent dès le début du séchage pour se stabiliser ($-10,70$ daN/m SM et $-6,50$ daN/m ST) pendant environ 8 heures. Les taux de relaxation du papier RK 19 sont de $T_{SM} = 64,30\%$ et $T_{TR} = 40,10\%$. La différence de comportement entre le sens machine et le sens travers est beaucoup plus marqué que dans le cas du papier RK 17. Les plus grands écarts observés sont de $16,64$ daN/m en SM et de $16,21$ daN/m ST.

4.1.5 Papier XIX

Les courbes de la figure (10) représentent l'évolution des tensions du papier XIX durant l'opération de mouillage.

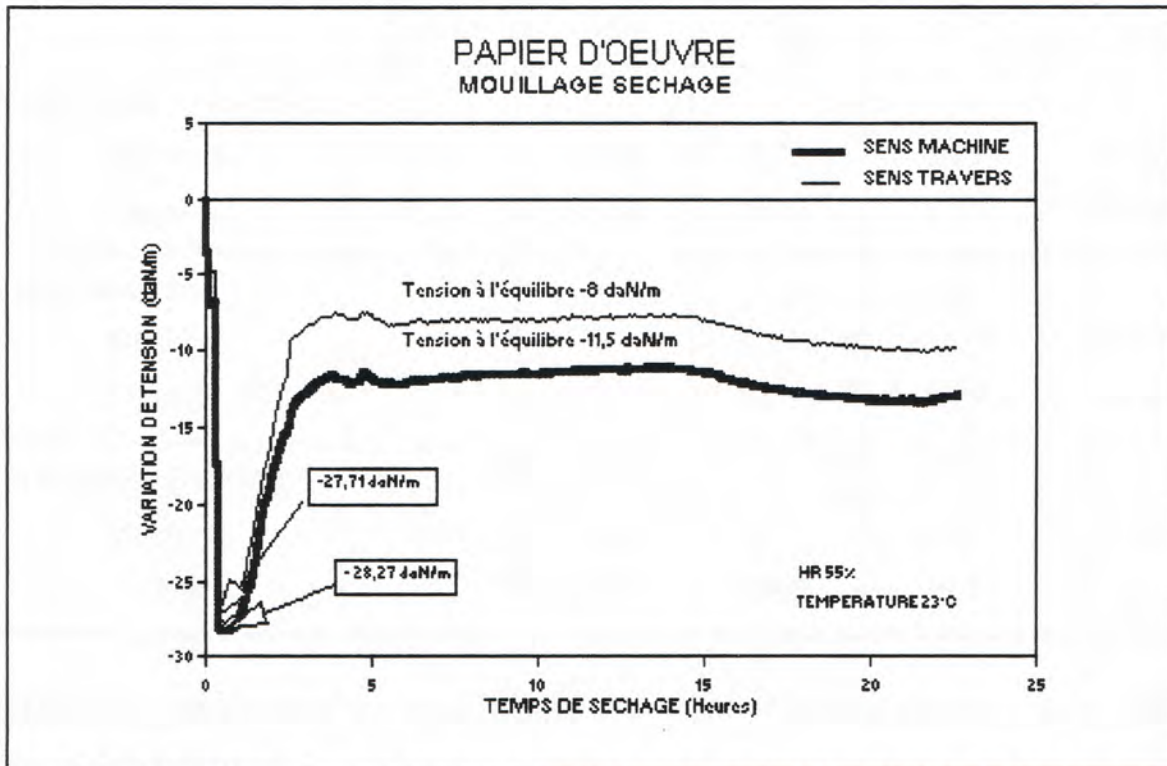


Figure 10: Variation des tensions du papier XIX durant le mouillage et séchage

Le comportement au mouillage de ce papier présente d'importantes variations de tension. Les valeurs minimales de tension (-28,27 daN/m SM et -27,71 daN/m ST) qui se manifestent tout de suite après le mouillage sont suivies par un accroissement des tensions jusqu'à l'équilibre (-11,5 daN/m SM et -8,0 daN/m ST). Les taux de relaxation du papier XIX, $T_{SM} = 40,7\%$ et $T_{TR} = 28,8\%$ sont plus faibles par rapport aux deux autres papiers malgré sa grande sensibilité à l'eau. Les variations de tensions les plus importantes sont de 28,27 daN/m SM et de 27,71 daN/m ST.

4.1.6 Remarques

Le tableau récapitulatif des valeurs va nous permettre de comparer le comportement des matériaux de renfort mouillés, par rapport aux papiers utilisés dans le domaine de la consolidation des dessins Tableau 4

Tableau 4:

	R.2024	C.202	RK17	RK19	XIX
Ecart tension max*.(daN/m)					
Machine	0,12	14,81	2,71	9,71	16,77
Travers	1,25	18,36	3,93	5,94	19,71
Taux de relaxation (%)					
Machine	/	/	73,45	64,3	40,76
Travers	/	/	62,32	40,1	28,8
Tension d'équilibre (daN/m)					
Machine	-1,25	1,5	-7,5	-10,7	-11,5
Travers	0,12	1,5	-6,5	-6,5	-8

*Cet écart représente la tension qui se développe entre la tension minimum au mouillage et la tension à l'équilibre. ΔT

D'après les résultats nous pouvons conclure que le REEMAY 2024 est un textile pratiquement inerte vis à vis de l'eau alors que le CEREX 202 est fortement influencé par l'humidité. En ce qui concerne les papiers une première remarque nous conduit à constater que les écarts de la tension maximale augmentent avec masse surfacique alors que les taux de relaxation décroissent. La seconde remarque nous amène à penser qu'il est difficile d'établir une relation de causes à effets entre les variations dimensionnelles (essais mentionnés tableau 3) et les variations de tension. Par exemple, aux allongements relatifs nuls obtenus en mouillant les papiers RK 17 et RK 19 en sens machine nous observons des variations de tensions qui sont loin d'être négligeables.

Après un premier mouillage, les papiers se relaxent au séchage alors que le CEREX se trouve en légère surtension et le REEMAY récupère la tension initiale. Bien que le CEREX et le papier soient hydrophiles ils présentent des comportements différents qui peuvent être incompatibles lors du collage.

**4.2 Comportement aux variations de l'humidité (20% --> 90%)
pour les matériaux suivants: papier XIX, CEREX, REEMAY, RK17, RK19.**

Les oeuvres sur papiers peints 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. Nous avons voulu examiner, à l'aide une série d'essais, le comportement des non-tissés et des papiers aux variations d'humidité. La procédure expérimentale se déroule en 2 étapes. Le matériau tendu sur le cadre extensiométrique subit dans un premier temps un mouillage suivi d'un séchage. Ensuite le cadre est introduit dans une enceinte climatique, figure (11).



Figure 11: Enceinte climatique

Cette enceinte de conception simple permet de créer artificiellement des climats sec et humide. Le climat sec (environ 20%), est obtenu par présence de silicagel déshydraté réparti dans l'enceinte. Le climat humide (environ 90%) est produit par l'évaporation d'eau contenu dans des récipients figure (12).



Figure 12: Dispositifs d'humidification et d'assèchement de l'enceinte

Un système de ventilation brasse l'air et rend le climat à l'intérieur à l'enceinte homogène. Le contrôle de l'humidité est assurée par une sonde Thermo hygrométrique SOLOMAT.

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 90% 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.

4.2.1 Variation moyenne de la tension dans le sens machine ($\Delta_m T_{ST}$)

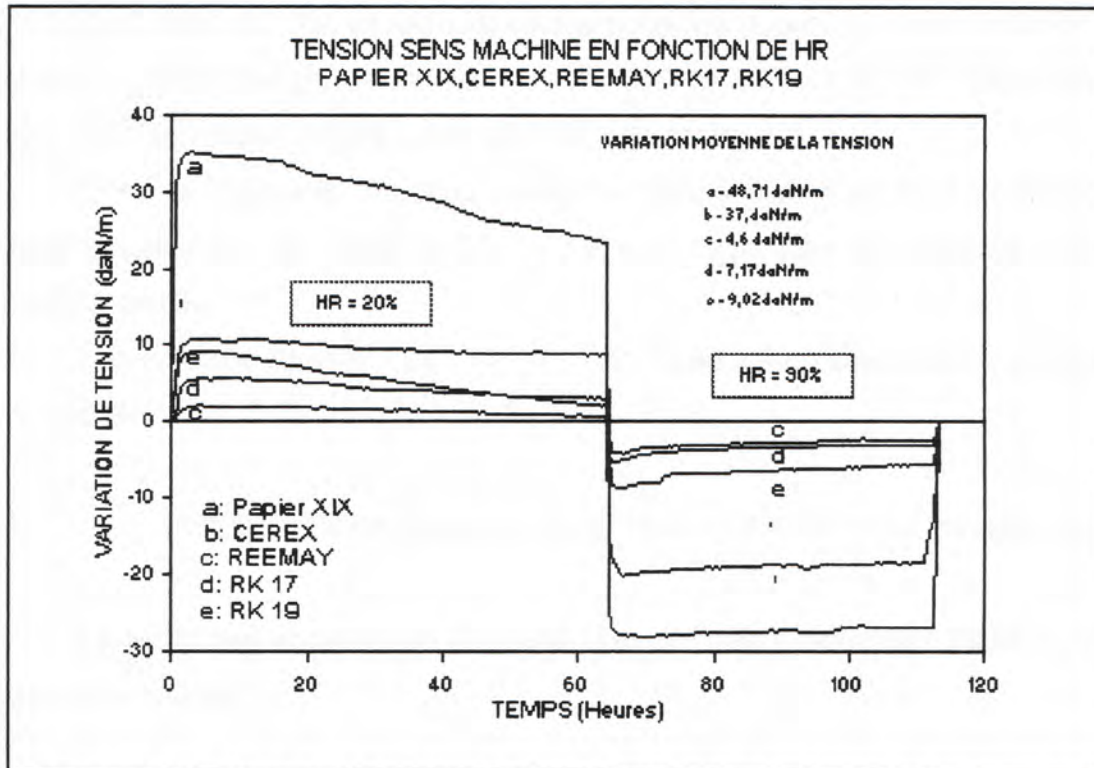


Figure 13: Variation de la tension des différents matériaux sens machine au changement de HR 20% ---> 90%

Les courbes de la figure (13) représentent l'évolution de la tension des matériaux étudiés à 20 et 90% d'humidité.

Pour évaluer leur sensibilité aux variations d'hygrométrie, nous avons défini la variation moyenne de la tension en sens machine et travers ($\Delta_m T_{ST}$). Elle est obtenue en faisant la différence entre la tension moyenne à 20% et la tension moyenne à 90%. D'après ces valeurs nous pouvons les classer les matériaux en trois groupes.

- A- Matériaux très sensibles aux variations de HR: Papier XIX et CEREX 202
- B- Matériaux moyennement sensibles aux variations de HR: RK 17, RK 19
- C- Matériau peu sensible aux variations de HR: REEMAY 2024

Dans le groupe A, le papier XIX et le CEREX ont des comportements différents, malgré leur sensibilité voisine. L'action de la sécheresse (HR=20%)

produit une élévation de la tension sur le papier XIX (35,11 daN/m) qui est environ 3 fois plus importante que sur le CEREX (10,86 daN/m). Par contre en présence d'humidité (HR=90%) le CEREX se relaxe davantage (-27,97 daN/m) que le papier XIX (-20,13 daN/m). Par conséquent nous pouvons remarquer que le papier XIX est plus sollicité par un climat sec qu'humide. Par ailleurs à 20% d'humidité le papier XIX se relaxe malgré une humidité constante.

Dans le groupe B, les deux matériaux sont sollicités différemment par les écarts d'humidité. Les tensions du RK 19 sont davantage influencées par une humidité élevée.

Les tensions dans le REEMAY 2024 sont peu influencées par les variations d'humidité.

4.2.2 Variation moyenne de la tension dans le sens travers ($\Delta_m T_{ST}$)

Le profil des courbes de la figure (14) est très proche des courbes de la figure précédente.

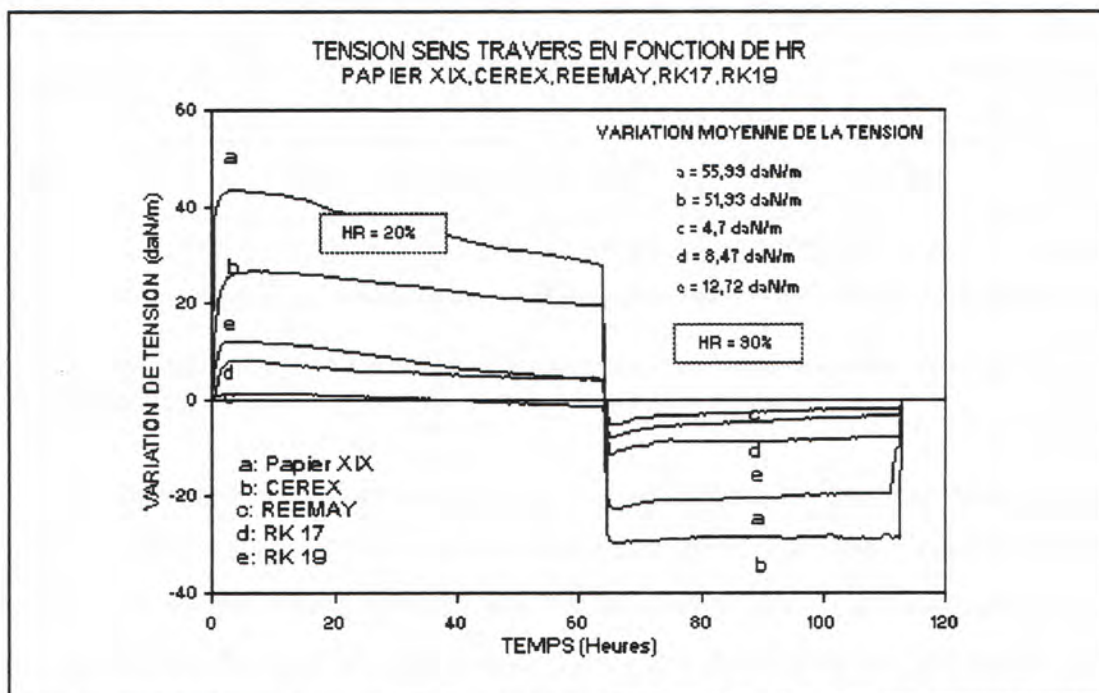


Figure 14: Variation de tensions SM des différents matériaux au changement HR 20%-->90%

Seule l'amplitude des variations moyennes de tension changent.

4.2.3 Anisotropie.

L'anisotropie rappelons-le permet d'apprécier la différence de comportement existant entre les sens machine et travers d'un matériau lors d'une sollicitation. Il existe plusieurs critères pour la définir. Ici nous l'appréhenderons en comparant les valeurs de tension maximum et minimum obtenues dans les sens machine et travers à 20% et 90% d'humidité . Les résultats sont regroupés dans le tableau 4.

TABLEAU 4

	HR20%		HR90%		HR20 %	HR90 %
	Tmax (daN/m)		Tmini (daN/m)		A (%)	A (%)
	M	T	M	T	*	*
Papier XIX	35,11	43,35	-20,13	-22,64	19	11
CEREX	10,86	26,79	-27,97	-29,61	59	6
REEMAY	2,25	1,34	-8,57	-11,35	40	24
RK 17	5,78	8,11	-4,15	-5,28	29	21
RK 19	9,26	12,21	-5,25	-7,76	24	32

A: anisotropie, ces valeurs ont été obtenues en appliquant la relation suivante: $((M/T) \times 100) - 100$. Plus A est proche de 0 plus le matériau a un comportement isotrope.

L'analyse des valeurs du tableau (4) fait apparaître que l'anisotropie varie avec l'humidité. Le CEREX à faible humidité présente une forte anisotropie (59%) alors qu'à humidité élevée l'anisotropie est très faible (6%). Ce phénomène est lié à la sensibilité à l'eau et aux propriétés plastiques des fibres de polyamide. Nous avons noté à ce propos que le CEREX se relaxe beaucoup à 90%. Ce sont les papiers japon qui ont le comportement le plus homogène.

5 ETUDE DES COLLAGES

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 exemple nous le transformons en une feuille multicouche. Cette opération modifie profondément la structure et le comportement du dessin original.

Dans un tel collage nous devons considérer au moins 3 éléments, le substrat ou dessin, la colle et le renfort. L'étude précédente sur les matériaux nous a permis d'aborder les comportements du substrat, du renfort et de la colle dans certaines conditions expérimentales. Dans ce chapitre nous allons essayer de mettre en évidence et de comprendre les mécanismes de collage et le comportement des feuilles multicouches à 20% et 90% d'humidité. La technique du suivi des tensions est une approche expérimentale qui nous permet d'opérer dans les conditions in situ et d'avoir des grandeurs que nous pouvons exploiter.

Comme nous l'avons rappelé dans l'introduction, le doublage se résume par l'assemblage d'au moins deux feuilles par l'intermédiaire d'un adhésif. Après le collage des deux feuilles, l'état de tension est différent. D'après les concepts que nous avons introduits (chapitre 1), il convient de limiter au maximum les contraintes dans le collage.

Pour restreindre les contraintes au niveau du doublage, il existe plusieurs possibilités; le choix du matériau de renfort ou de l'adhésif et la mise en oeuvre. Dans cette étude nous porterons notre effort sur l'influence du renfort sur le comportement du dessin doublé, et sur sa mise en oeuvre.

5.1 Origine des tensions dans le collage de 2 feuilles

Rappelons avant tout que les tensions apparaissent durant le collage si les feuilles sont maintenues. Lorsqu'elles se trouvent libres, des déformations telles que le retrait et l'enroulement des feuilles se manifestent. Fixées sur le cadre extensiométrique chaque feuille agit selon les deux cas de figure suivants:

a) Les feuilles 1 et 2 sont fixées sur le dispositif de mesure figure (15)

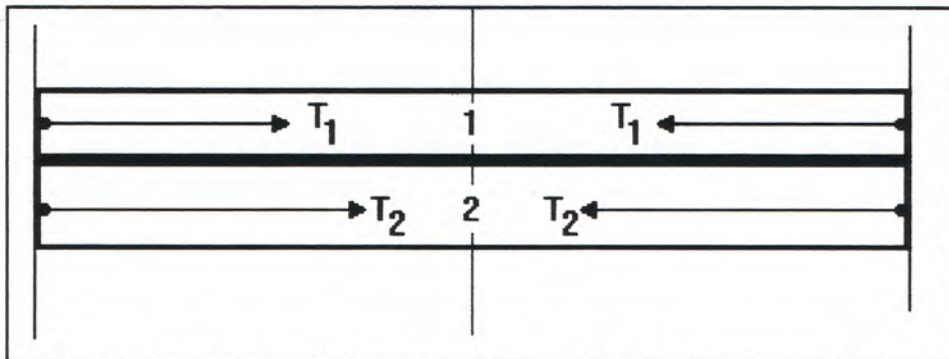


Figure 15: Les feuilles 1 et 2 sont fixées sur le cadre extensiométrique

La tension enregistrée correspond à la somme des tensions provoquées par les 2 feuilles durant le séchage.

$$T = T_1 + T_2$$

Les tensions originelles de l'adhésif (§ 3.3.2) sont négligeables par rapport aux tensions développées par les éléments collés.

b) La feuille 1 est collée sur la feuille 2 qui est fixée sur le dispositif de mesure figure (16).

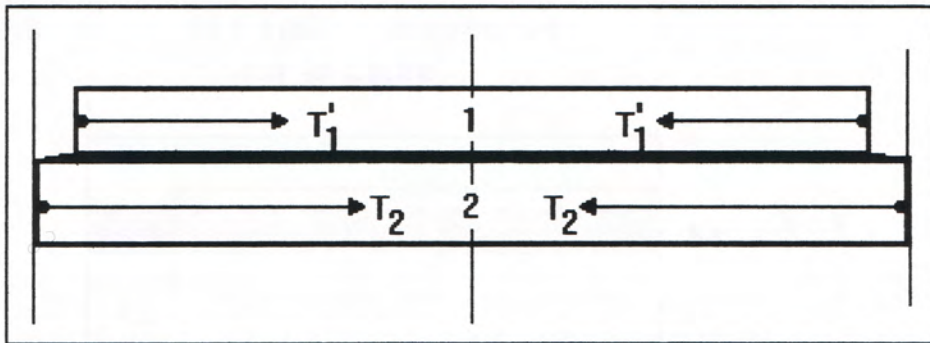


Figure 16: La feuille 1 est collée sur la feuille 2 qui est fixée sur le cadre extensiométrique

La tension correspond également à la somme des tensions provoquées par les deux feuilles.

$$T' = T'_1 + T_2$$

Comme la feuille 1 n'est pas fixée mais collée, elle peut se rétracter durant le séchage. Elle ne se contractera pas autant que si elle était libre, mais suffisamment, si l'adhésif suit la déformation. Par conséquent, l'allongement de la feuille par rapport à la longueur initiale l_0 est plus faible dans le cas où la feuille n'est pas fixée sur le bord du cadre, figure (17)

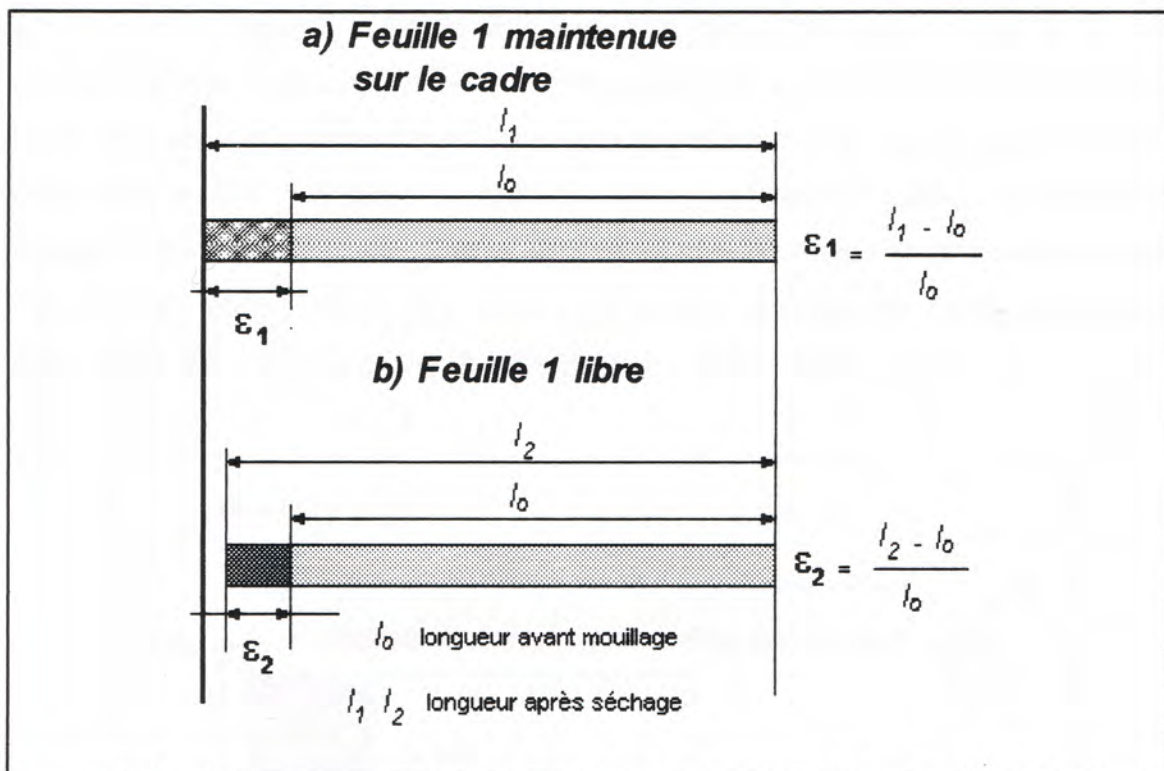


Figure 17: Représentation des variations dimensionnelles de la feuille 1 dans le cas où elle est maintenue (a) ou libre (b)

D'après la géométrie de l'assemblage toutes les forces de tensions transitent par le ou les matériaux tendus. C'est la composante de ces forces qu'enregistre le cadre extensiométrique.

5.2 Evolution des tensions durant le séchage du collage

Pour tirer le meilleur parti de la phase expérimentale nous avons commencé par faire des assemblages simples de 2 feuilles de nature différente en suivant le protocole expérimental suivant. Nous avons tendu sur le cadre extensiométrique l'une des deux feuilles. La tension initiale est de 15 daN/m. Nous avons simultanément encollé la feuille libre avec l'un des adhésifs choisis (§ 3-3), ainsi que la feuille tendue. Ensuite nous avons positionné et appliqué la feuille libre sur la feuille tendue 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. Durant cette opération les matériaux mouillés se détendent plus ou moins et rendent le collage délicat. Enfin pour éviter le décollement pendant le séchage, les bords de la feuille collée sont maintenus par une bande de papier kraft, figure (18)

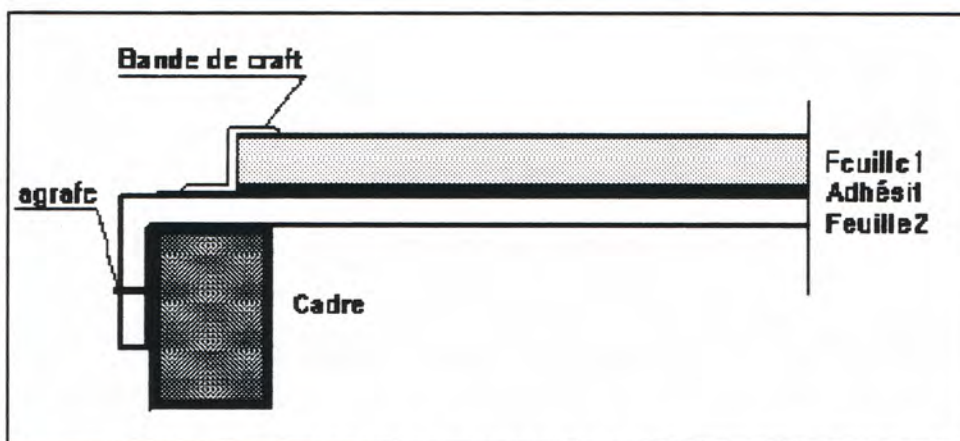


Figure 18: Dispositif de maintien des feuilles sur le cadre extensiométrique

5.2.1 RK 17 sur REEMAY 2024

Le REEMAY 2024 est tendu sur le cadre extensiométrique. Le RK 17 est collé avec le mélange PLEXTOL B 500 / CMC selon le protocole expérimental décrit précédemment. Dans la figure (19) nous avons regroupé les courbes de comportement au mouillage du REEMAY 2024, du RK 17, et des éléments collés.

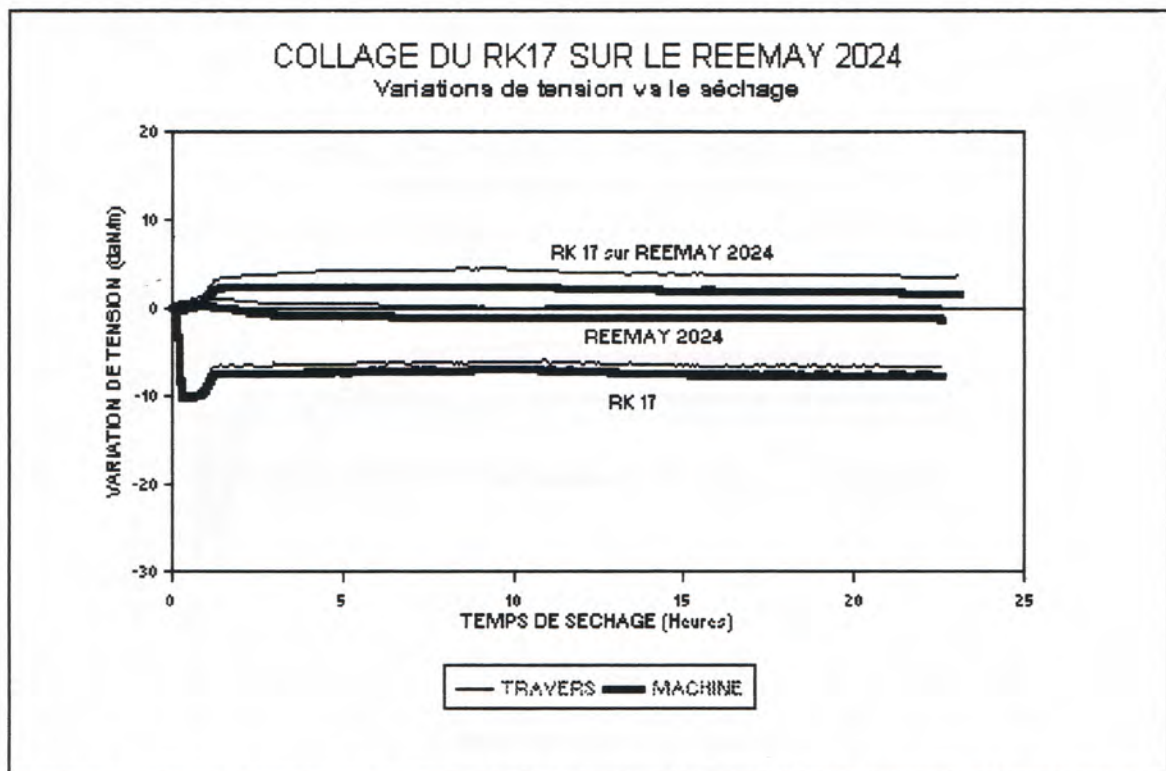


Figure 19: Variation de tension durant le collage des feuilles du RK 17 sur le REEMAY 2024

Les trois groupes de courbes sont distincts.

Le collage du RK 17 sur le REEMAY 2024 fait apparaître un nouveau comportement de l'assemblage issu du comportement des deux constituants. Nous pouvons penser que le RK 17^{*} est à l'origine de la surtension qui survient durant le séchage et s'équilibre vers 3,90 daN/m TR et 2,07 daN/m MA.

^{*} Noter et peut-être l'adhésif.

5.2.2 RK 17 sur CEREX 202

Nous avons tendu le CEREX 202 sur le cadre extensiométrique et nous avons procédé au collage du RK 17 selon le protocole défini. Le suivi des tensions durant le séchage est représenté par les courbes de la figure (20.)

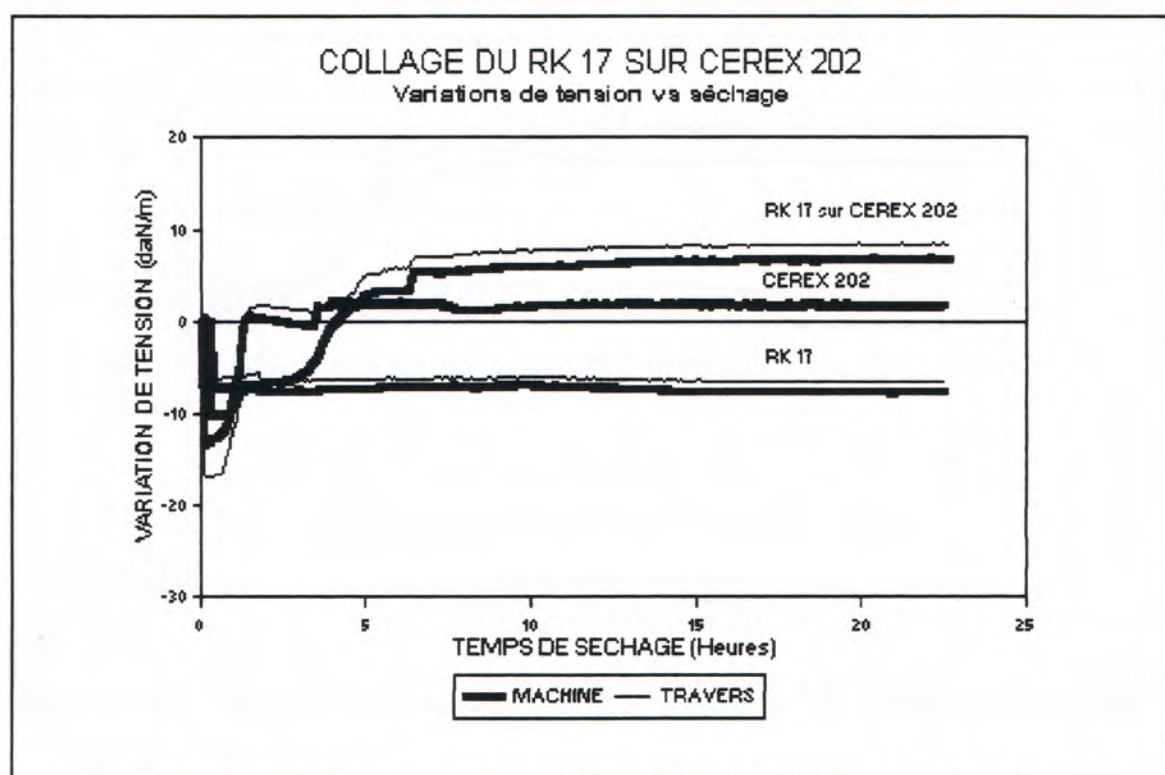


Figure 20: Variation de tension durant le collage du RK 17 sur le CEREX 202

Comme dans les cas précédents le comportement au séchage de l'assemblage RK17 sur le CEREX est différent des éléments qui le composent. Au mouillage par la colle, l'assemblage se détend. Au cours du séchage, nous observons une croissance des tensions qui atteignent un équilibre vers 6,35 daN/m MA et 8 daN/m TR.

5.2.3 RK 19 sur papier XIX

Le papier XIX est tendu sur le cadre extensiométrique, le RK 19 est collé selon le protocole déterminé. Nous avons regroupé dans la figure (21) les courbes de comportement au mouillage du papier XIX et du RK 19 et de l'assemblage par collage des deux papiers.

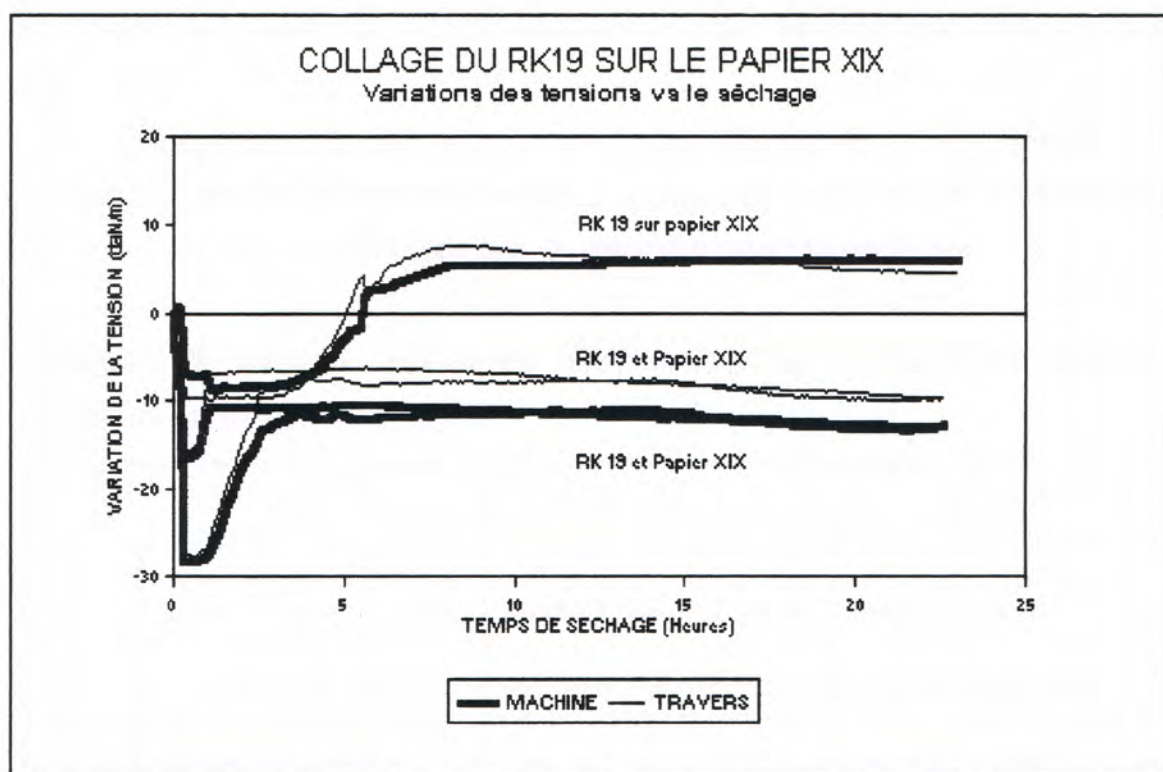


Figure 21: Variation de la tension durant le collage du RK 19 sur le papier XIX

Le comportement sens machine et travers des feuilles de papiers collées sont proches, seule l'amplitude des tensions varie légèrement. Nous remarquons que l'assemblage des 2 papiers donne naissance à un nouveau comportement. Les courbes de l'évolution des tensions présentent un minimum qui correspond à la détension due au mouillage par la colle et un accroissement des tensions lors du séchage. Les surtensions se stabilisent vers 5,72 daN/m SM et 5,88 daN/m ST.

5.2.4 Interprétation des résultats

Les 3 collages mettent en oeuvre 2 feuilles de matériaux différents. Leur comportement au séchage présente des analogies:

La montée de la tension durant le séchage est ralentie. Elle s'explique par la rétention d'eau du carboxyméthyle cellulose contenu dans l'adhésif.

Les assemblages accumulent les tensions par rapport aux éléments constitutifs. Nous l'avons montré théoriquement que les tensions de chaque feuille *s'ajoutent*

Dans le tableau (5) nous avons regroupé les valeurs des tensions au séchage obtenues expérimentalement T' et les valeurs de tension au séchage T obtenues par addition des tensions au séchage de chaque feuille.

TABLEAU 5: Tableau récapitulatif des tensions au séchage des différents matériaux et de leur assemblage.

RK 17		R.2024		CEREX 202		RK 19		Papier XIX	
M daN/m	T daN/m	M daN/m	T daN/m	M daN/m	T daN/m	M daN/m	T daN/m	M daN/m	T daN/m
2,71	3,93	0,12	1,25	14,81	18,36	5,94	9,71	16,77	19,7
		RK 17/ R.2024		RK 17/C.202		RK 19/Pap.XIX			
		M daN/m	T daN/m	M daN/m	T daN/m	M daN/m	T daN/m		
Tension = T'		2,48	4,48	13,65	14,36	14,47	15,80		
Tension = T		2,83	5,18	17,52	22,29	22,71	29,41		

Exploitions les valeurs de ce tableau en faisant quelques comparaisons. Prenons par exemple la valeur expérimentale $T'_{RK17/2024} = 2,48 \text{ daN/m}$ (SM) déterminée expérimentalement pour le collage du RK 17 sur le REEMAY 2024. Comparons cette valeur aux valeurs (SM) de ses éléments constitutifs, nous avons:

$$T_{R2024} = 0,12 \text{ daN/m} < T'_{RK17/2024} = 2,48 \text{ daN/m} < T_{RK17} = 2,71 \text{ daN/m}$$

Cette inéquation nous permet de supposer que l'équilibre des forces s'établit si le REEMAY 2024 absorbe une partie des tensions qui se sont développées dans le RK17 durant le séchage. N'oublions pas également qu'une partie des tensions se dissipent lorsque la feuille de RK17 subit un léger retrait au séchage. Nous constatons le même phénomène dans le sens travers.

Maintenant prenons la valeur expérimentale $T'_{RK17/C202} = 13,65 \text{ daN/m}$ du collage du RK 17 sur le CEREX 202. En procédant au même raisonnement nous obtenons l'inéquation suivante.

$$T_{RK17} = 2,71 \text{ daN/m} < T'_{RK17/C202} = 13,65 \text{ daN/m} < T_{C.202} = 14,81 \text{ daN/m}$$

Dans ce cas nous voyons que les rôles sont inversés. Le CEREX 202 transmet sa surtension à la feuille de RK 17 qui lui est collée dessus.

Autrement dit, pour atteindre l'équilibre des tensions au sein du collage, il existe deux types de phénomène si nous nous plaçons au niveau de la feuille tendue:

a) Absorption par la feuille tendue de renfort des tensions qui se développent dans la feuille supérieure. C'est le cas du REEMAY et du RK 17.

b) Transmission par la feuille tendue de renfort de ses tensions au sein de la feuille supérieure. C'est le cas du CEREX 202 et du papier XIX.

Comme notre objectif est d'identifier le collage qui entraîne l'élévation des tensions les plus faibles ou les contraintes les plus limitées, nous constatons qu'entre les 3 cas étudiés, le collage du RK 17 sur le REEMAY semble présenter la meilleure solution. D'autre part nous pressentons bien que si la feuille de renfort absorbe l'excès de tension développé par la feuille collée (dessin original) celui-ci joue un double rôle qui répond parfaitement aux exigences de stabilité dans le collage. Le REEMAY 2024 dans les limites de cette étude paraît remplir ce rôle.

5.3 Influence de la mise en oeuvre d'un doublage

Nous allons tenter d'éclaircir certaines particularités qui caractérisent la mise en oeuvre d'un doublage. Nous avons simulé deux doublages sur un non tissé à l'aide des mêmes matériaux en inversant la mise en oeuvre:

- Le collage du papier XIX doublé de RK 19 sur le REEMAY 2024 renforcé de RK17

- Le collage du REEMAY 2024 renforcé de RK17 sur le papier XIX doublé de RK 19.

Ces deux doublages ont une stratigraphie rigoureusement identique, figure (22)

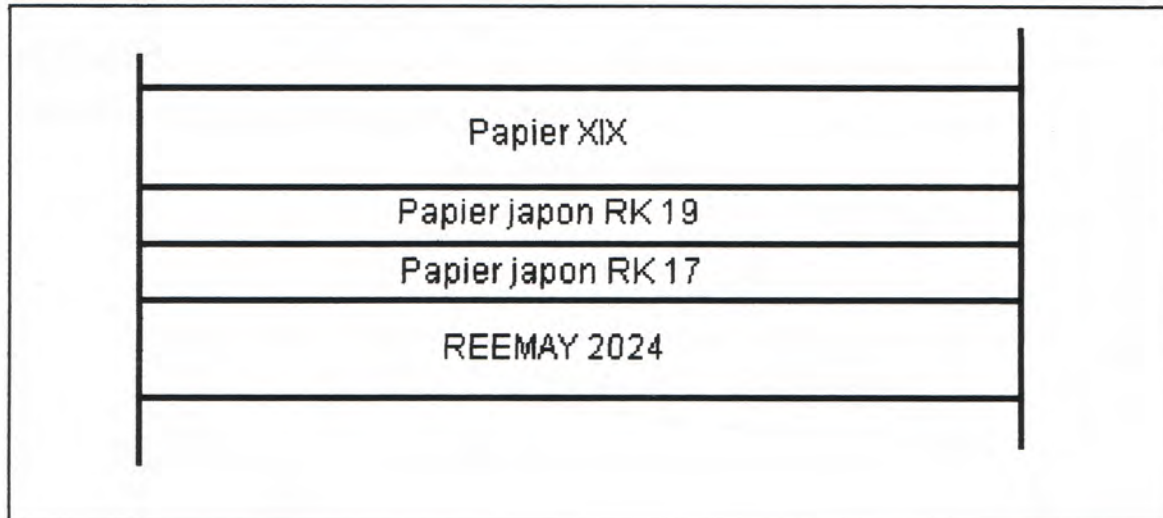


Figure 22: Stratigraphie du doublage

Pour réaliser ces deux doublages nous avons suivi les protocoles expérimentaux suivants. Dans le premier doublage 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 XIX de RK 19. L'ensemble a été collé en respectant la procédure définie. Nous l'appellerons doublage 1. Dans le deuxième cas c'est le papier XIX 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 XIX. Nous le nommerons doublage 2.

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 courbes de la figure (23) représentent l'évolution de la tension dans les deux cas de figure. Elles ont des allures différentes et très remarquables bien que les éléments assemblés soient identiques.

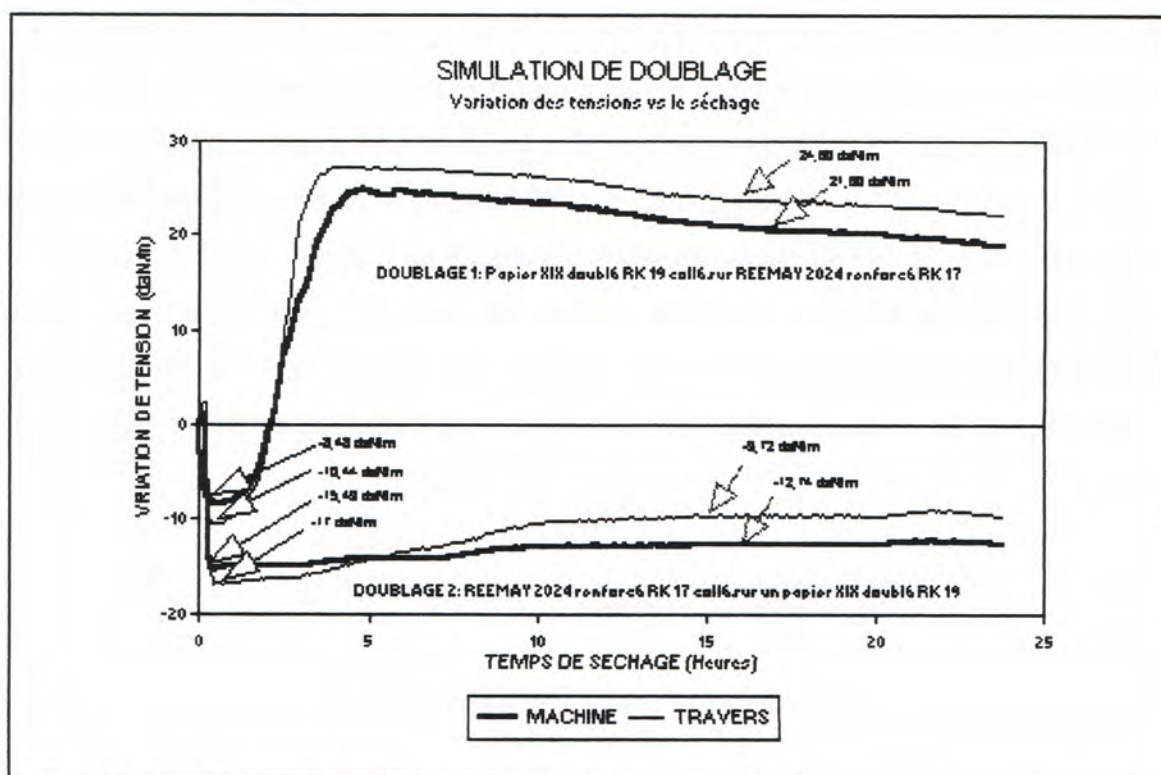


Figure 23: Variation de tension des doublages 1 et 2

Le doublage 1- Les tensions se relaxent dès que la colle est appliquée (-8,48 daN/m ST, -10,44 daN/m SM), pour s'élever brutalement au cours du séchage à des valeurs moyennes (21,60 daN/m ST, 24,60 daN/m SM).

Le doublage 2- Les tensions se relaxent rapidement à partir du moment où la colle est étendue, (-17 daN/m ST, - 15,49 daN/m SM). Durant la phase de séchage, les tensions s'accroissent légèrement pour se stabiliser à de faibles tensions (- 9,72 daN/m ST, -12,74 daN/m SM).

5.4 Analyse des résultats

A priori, nous pouvons être étonné de constater qu'un même doublage exécuté en inversant l'ordre des opérations de collage donne lieu à des résultats aussi différents. Nous avons vu (§ 5.2.4) que le REEMAY 2024 a tendance à absorber les tensions et le papier XIX à les transmettre.

Dans le doublage 1 le REEMAY 2024 renforcé de RK 17 est tendu sur le cadre extensiométrique. Il transmet parfaitement bien au cadre les tensions qui se développent dans le papier XIX doublé de RK 19. L'additivité des forces est respectée en sens travers mais elle est un peu plus élevée en sens machine.

$$30 \text{ daN/m S.M.} < T_{\text{enregistrée}} < 35 \text{ daN/m S.T.}$$

$$25 \text{ daN/m S.M} < T_{\text{calculée}} < 35 \text{ daN S.T.}$$

Après le collage, le doublage 1 se trouve en état de surtension.

Dans le doublage 2, le papier XIX doublé de RK 19 est tendu sur le cadre extensiométrique. Les résultats obtenus:

$$2,75 \text{ daN/m S.M} < T_{\text{enregistrée}} < 7,28 \text{ daN/m S.T.}$$

montrent que les tensions ne sont pas intégralement transmises par le papier doublé au cadre extensiométrique. Nous pouvons supposer qu'elles sont absorbées comme dans le cas précédent par le REEMAY 2024 renforcé RK 17.

Après le collage, le doublage 2 se trouve en état de relaxation.

Les mécanismes observés (§ 5.2.4) sont vérifiés. Malgré l'intérêt que présentent ces résultats vis à vis la minimisation des tensions durant la mise en oeuvre d'un doublage, il faut ^{être} prudent pour plusieurs raisons. D'un part nous n'avons pas pu appliquer un protocole expérimental rigoureusement identique à la pratique du doublage. Bien que la faisabilité des essais soit bonne, nous avons fait qu'un essai de chaque collage. A partir de cette situation les phénomènes restent plutôt descriptifs. Cependant nous pouvons supposer que le REEMAY 2024 ayant une élasticité environ 10 fois plus importante que le papier est en mesure d'absorber les surtensions du papier XIX.

5.5 Comportement des collages aux variations d'humidité (20% --> 90%)

Les collages ont été soumis à une forte variation d'humidité afin de connaître leur comportement dans ce genre de situation. Pour évaluer la sensibilité aux variations de HR nous avons utilisé la variation moyenne de tension ($\Delta_m T$) comme dans les § 4.2.1 et 4.2.2.

5.5.1 RK 17 sur REEMAY 2024 et RK 17 sur CEREX 202.

En choisissant ces deux collages nous avons pu comparer l'influence des non-tissés sur leur comportement. Rappelons que le REEMAY 2024 est hydrophobe, et le CEREX 202 est hydrophile.

Les courbes de la figure (24) permettent d'évaluer la variation moyenne de la tension ($\Delta_m T$) des assemblages soumis à des hygrométries de 20% et de 90%.

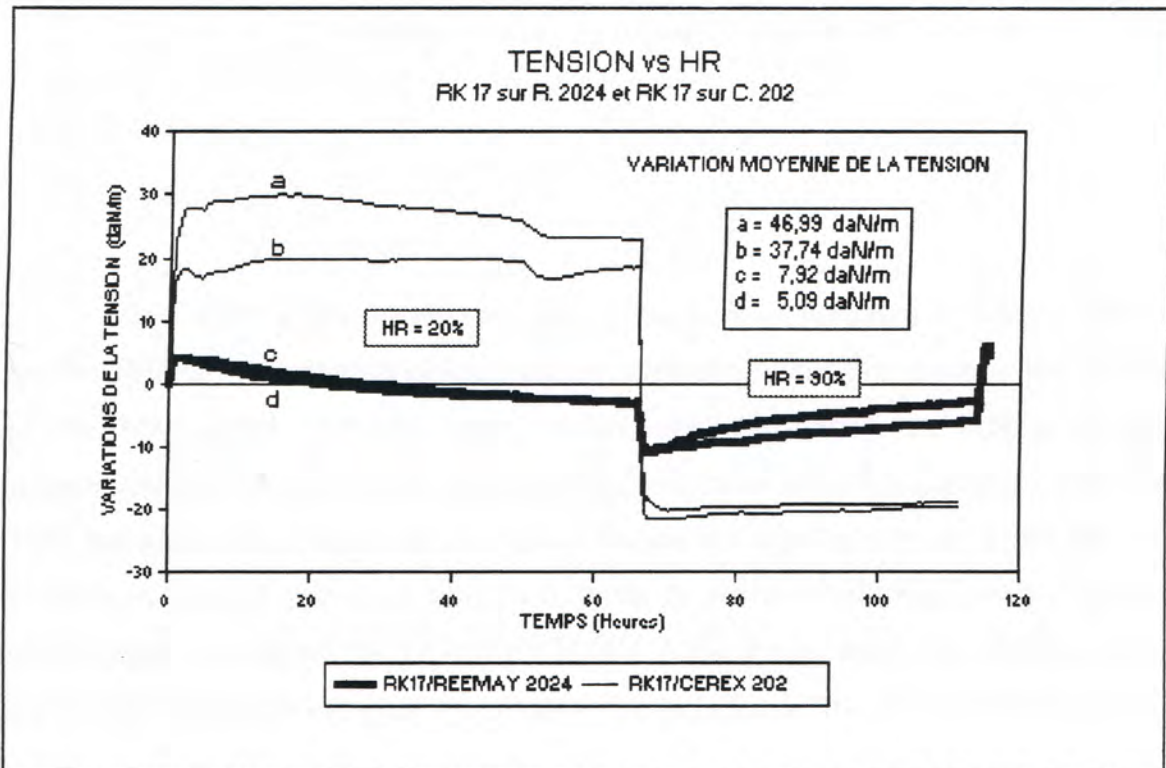


Figure 24: Variation de tension des collages RK 17 sur REEMAY 2024 et RK 17 sur CEREX 202 au changement d'humidité 20% ---> 90%

Pour le collage RK 17 sur REEMAY 2024 la variation moyenne de tension ($\Delta_m T$) est comprise entre:

$$6,3 \text{ daN/m S.M} < \Delta_m T < 8,10 \text{ daN/m S.T.}$$

et pour l'assemblage RK 17 sur CEREX 202, elle est de:

$$37,7 \text{ daN/m S.M} < \Delta_m T < 46,2 \text{ daN/m S.T.}$$

Nous voyons immédiatement que la réactivité à l'humidité du collage RK 17 sur le CEREX 202 est beaucoup plus importante que celle du collage RK 17 sur le REEMAY 2024. Comme nous l'avons déjà souligné, les propriétés des assemblages étudiés sont des émanations des propriétés des matériaux collés. **Ce sont les nouvelles propriétés de l'assemblage qui agiront sur sa durée de vie.** D'après ce que nous connaissons de la durée de vie des matériaux, nous pouvons prévoir que le collage RK 17 sur REEMAY 2024 présentera une résistance au vieillissement beaucoup plus importante que le collage RK 17 sur CEREX 202.

5.5.2 Doublages 1 et 2

Nous allons également étudier l'influence de la mise en oeuvre sur le comportement des doublages soumis aux variations de l'humidité relative. Les essais ont été fait sur les doublages 1 et 2. Les courbes de la figure (25) nous permettent de suivre l'évolution des tensions aux humidités relatives de 20% et 90%.

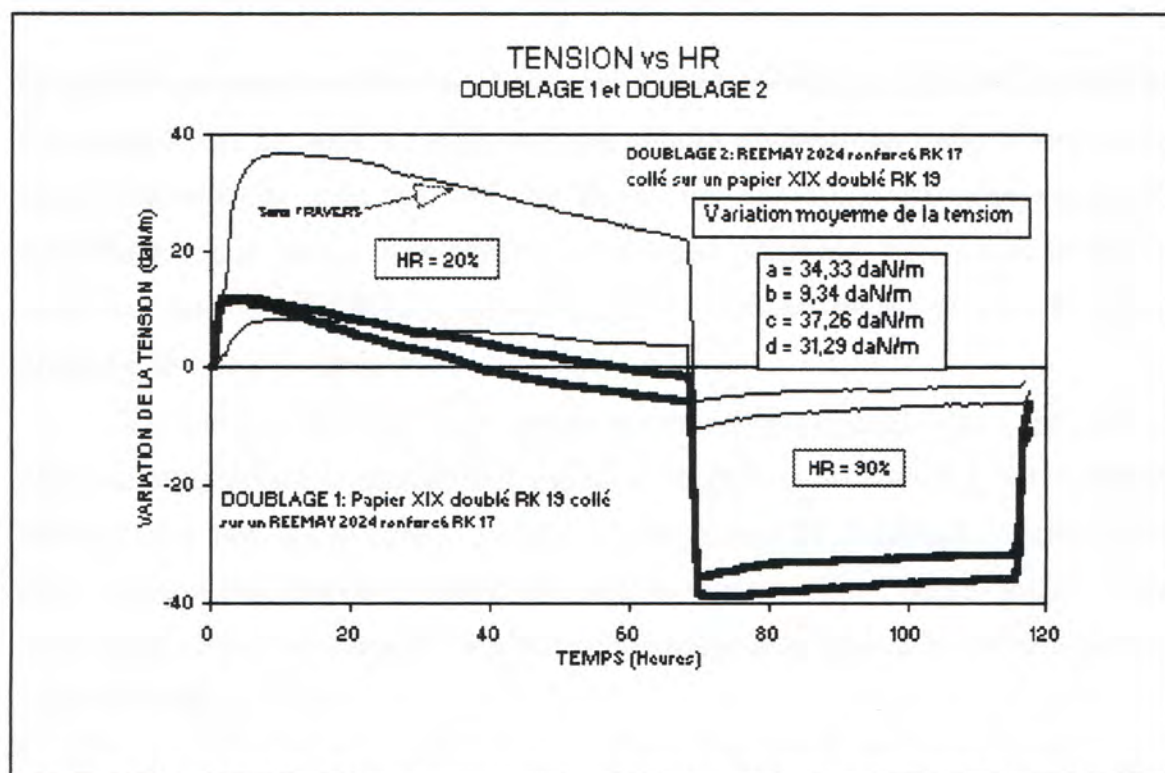


Figure 25: Variation de tension des doublages 1 et 2 au changement d'humidité 20% ---> 90%

Le comportement en sens machine et en sens trame du doublage 1,

$$31,29 \text{ daN/m S.M} < \Delta_m T < 37,26 \text{ daN/m S.T}$$

est assez homogène. Les variations moyennes de tension du doublage 1 sont comprises entre les variations moyennes de tension du papier XIX et du REEMAY 2024. Là encore le REEMAY 2024 absorbe une partie des tensions.

Le comportement en sens machine et en sens trame du doublage 2 est très hétérogène,

$$9,34 \text{ daN/m S.M} < (\Delta_m T) < 34,33 \text{ daN/m S.T}$$

La tension en sens machine ne reflète pas véritablement le comportement attendu. Dans les limites de cette étude il nous est difficile d'interpréter cette différence de comportement car nous n'avons pas pu vérifier la validité de cette valeur. En admettant que la valeur 9,34 daN/m soit erronée pour une raison quelconque, la tension moyenne dans le sens travers $(\Delta_m T) = 34,33 \text{ daN/m S.T}$ se situe au même niveau que dans le doublage 1.

A la suite du séchage nous avons remarqué que le doublage 1 est dans un état surtendu et que le doublage 2 est dans un état de relaxation § 5.4. L'état de tension se reflète sur le comportement aux variations de l'humidité relative. L'état le plus relaxé est très réactif au climat sec, la tension atteint 36,85 daN/m. L'état de surtension est plus sensible aux fortes humidités et la tension chute brutalement - 39,05 daN/m.

Que pouvons tirer comme leçon de ces essais, en appliquant les concepts introduits dans le chapitre 1 ?

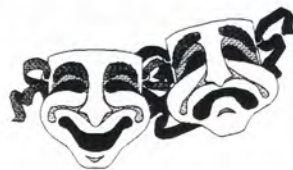
Si le doublage évolue dans un environnement stable, nous pouvons admettre que la mise en oeuvre du doublage 2 permet de limiter au mieux l'état de tension dans le collage. Par contre si le doublage évolue dans un milieu instable et sec, il est souhaitable d'adopter la mise en oeuvre du doublage 1. Celle-ci évite des surtensions à faible humidité.

CONCLUSION

Le développement de cette étude nous a permis progressivement de mieux connaître le comportement mécanique des matériaux qu'utilisent les restaurateurs des arts graphiques. Nous avons également mis en évidence certains mécanismes qui se manifestent durant les opérations de traitements des papiers. Toutefois nous savons que les restaurateurs appréhendent intuitivement tous ces phénomènes dans la pratique de leur métier.

Nos observations et nos remarques se proposent d'attirer l'attention des restaurateurs sur des aspects particuliers du comportement mécanique des matériaux qu'ils utilisent. Elles peuvent aussi leur faire prendre conscience des transformations que l'oeuvre subit durant certains traitements.

Pour en revenir à cette étude, nous avons fait apparaître une différence fondamentale entre le collage de deux matériaux hydrophiles et le collage de matériaux hydrophile et hydrophobe. Cette différence se manifeste au niveau des tensions dans le collage après le séchage et au niveau de la réactivité de l'assemblage aux variations d'humidité. C'est en reliant les résultats d'expérience aux concepts que nous avons introduit, que nous avons pu définir un degré de stabilité des doublages exécutés. Nous avons donc noté que les supports de renfort conçus à partir de non-tissés de polyester remplissent bien leur rôle. Nous pouvons supposer bien entendu qu'il existe d'autres matériaux qu'il serait intéressant d'étudier et d'exploiter.



REMERCIEMENTS

Je remercie France DIJOU et Nathalie VOLLE de m'avoir confié cette étude.
Je remercie également Marie Christine ENSCHAIAN de sa participation à certains essais. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Monsieur G. VILLOUTREIX qui a eu la gentillesse de m'accueillir dans son laboratoire au CNAM.



Liste des fournisseurs

Papier japon RK 17 et RK 19
ATLANTIS 26 rue des petits champs 75002 Paris

Papier XIX
Musée d'ANGERS

CEREX 202
ATLANTIS 26 rue des petits champs 75002 Paris

REEMAY 2024
NORDLYS 17 rue Emile-Hié 59270 Bailleul

ANNEXE

CONDITIONS EXPERIMENTALES

Humidité(%) 50
Température(°C) 23

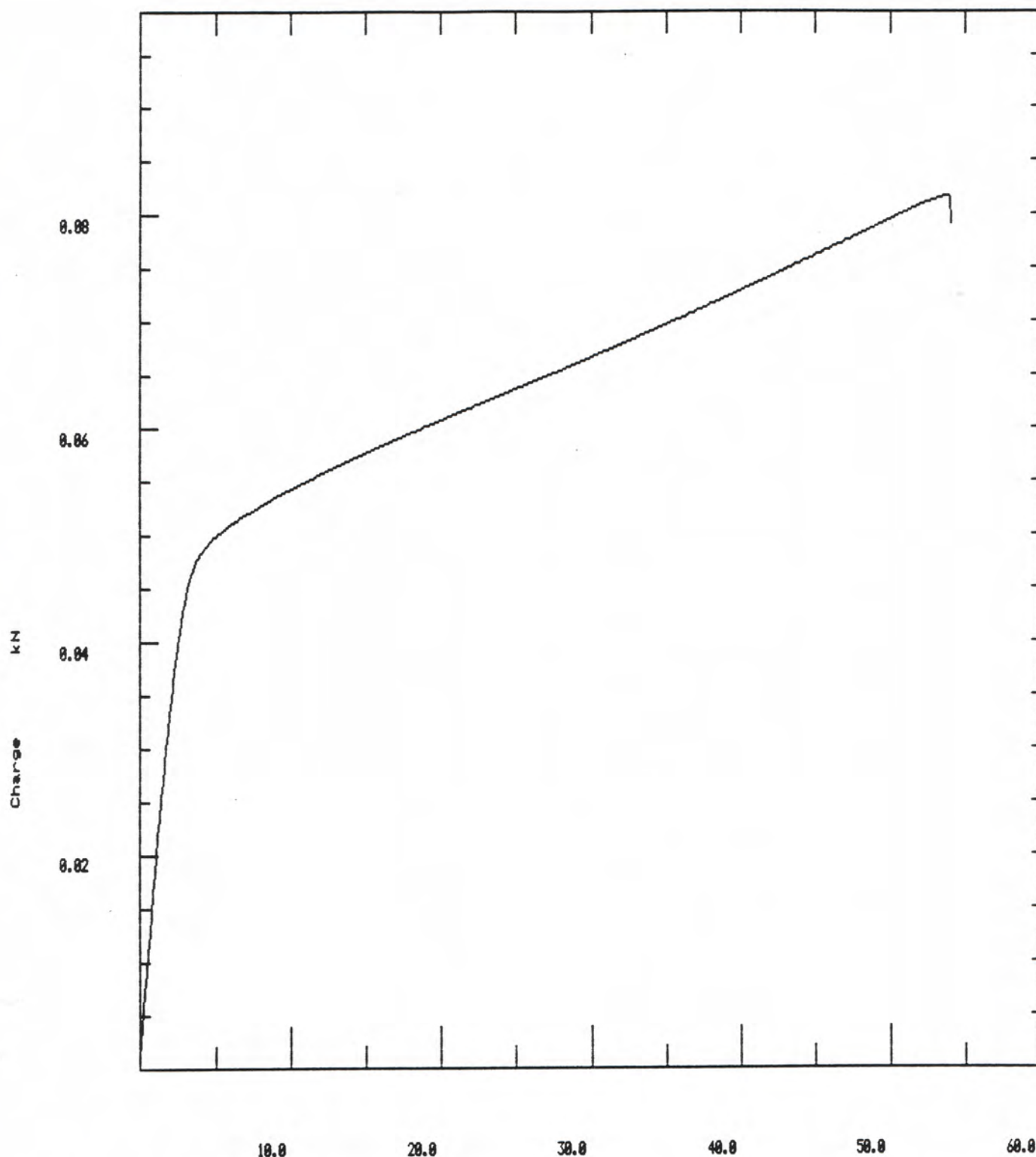
ESSAI DE TRACTION

(Instron 4507)

REEMAY 2024 sens machine

2024SH

MOYENNE

CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES

Largeur (mm): 25
Epaisseur (mm): 0.5
Longueur initiale (mm): 250
Distance entre mors (mm): 180
Nombre d'essais: 6

Déplacement (mm)

PARAMETRES MACHINE

Vitesse d'acquisition (pts/s) 10
Vitesse de la traverse(mm/min) 200

ESSAI DE TRACTION

(Instron 4507)

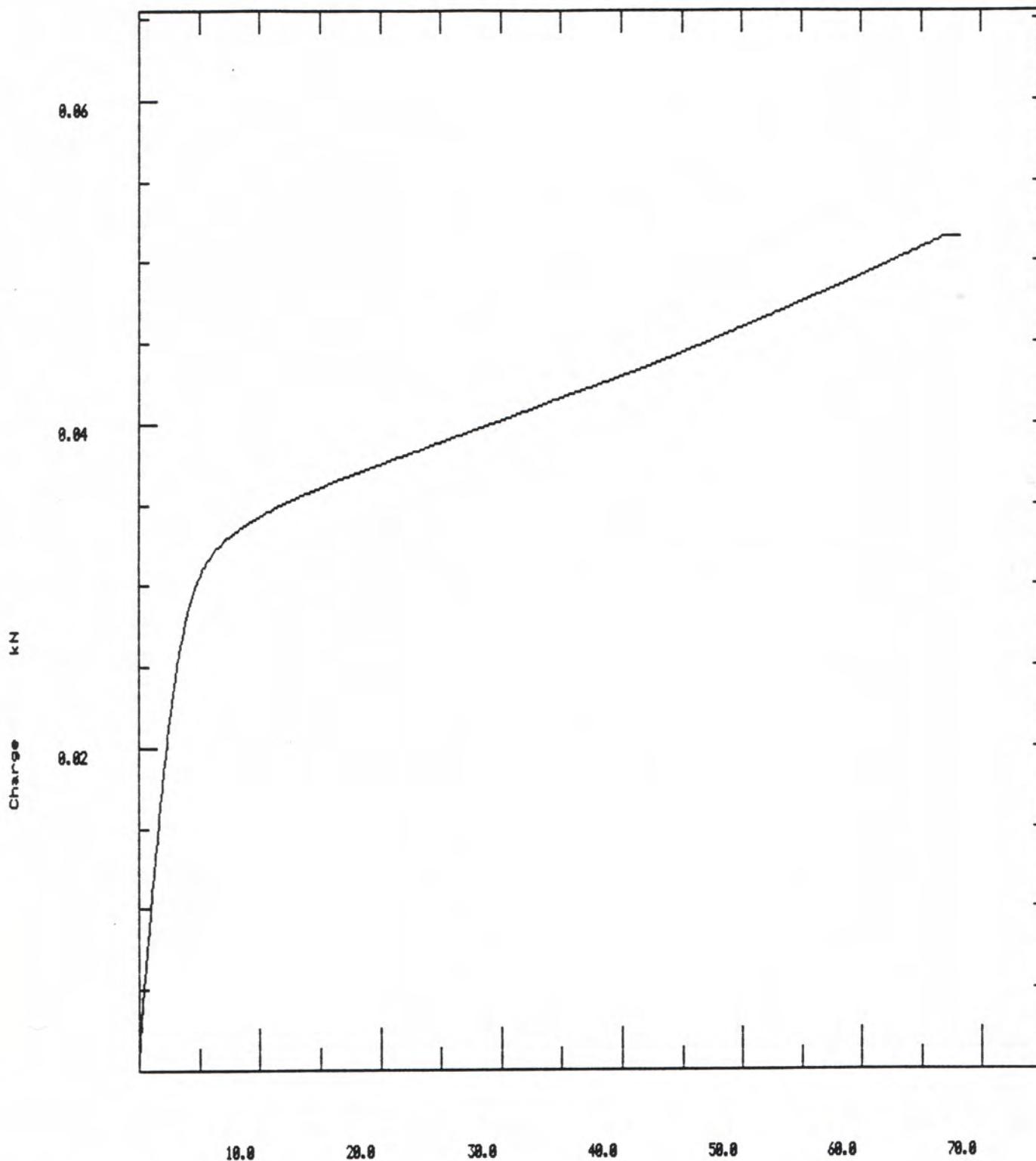
CNAM 292 rue St Martin 75003

CONDITIONS EXPERIMENTALES

Humidité(%) 50
Température(°C) 23

REEMAY 2024 sens travers

2024ST MOYENNE



CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES

Largeur (mm): 25
Epaisseur (mm): 0.5
Longueur initiale (mm): 250
Distance entre mors (mm): 180
Nombre d'essais: 6

Déplacement (mm)

PARAMETRES MACHINE

Vitesse d'acquisition (pts/s) 10
Vitesse de la traverse(mm/min) 200

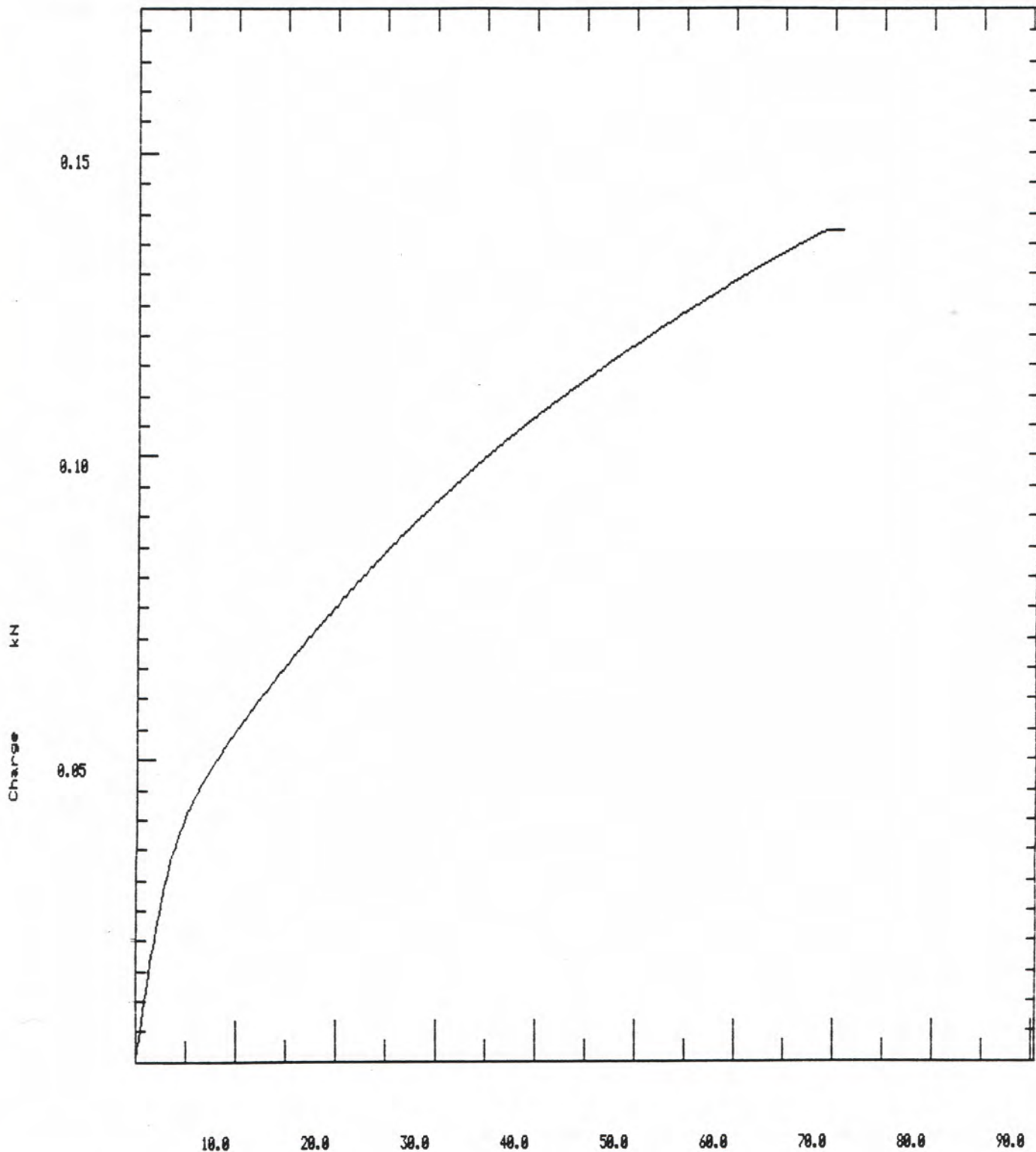
ESSAI DE TRACTION (Instron 4507)

CNAM 292 rue St Martin 75003

CONDITIONS EXPERIMENTALES

Humidité(%) 50
Température(°C) 23

CEREX 202 sens machine



CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES

Largeur (mm): 25
Epaisseur (mm): 0.5
Longueur initiale (mm): 250
Distance entre mors (mm): 180
Nombre d'essais: 6

Déplacement (mm)

PARAMETRES MACHINE

Vitesse d'acquisition (pts/s) 10
Vitesse de la traverse(mm/min) 200

ESSAI DE TRACTION

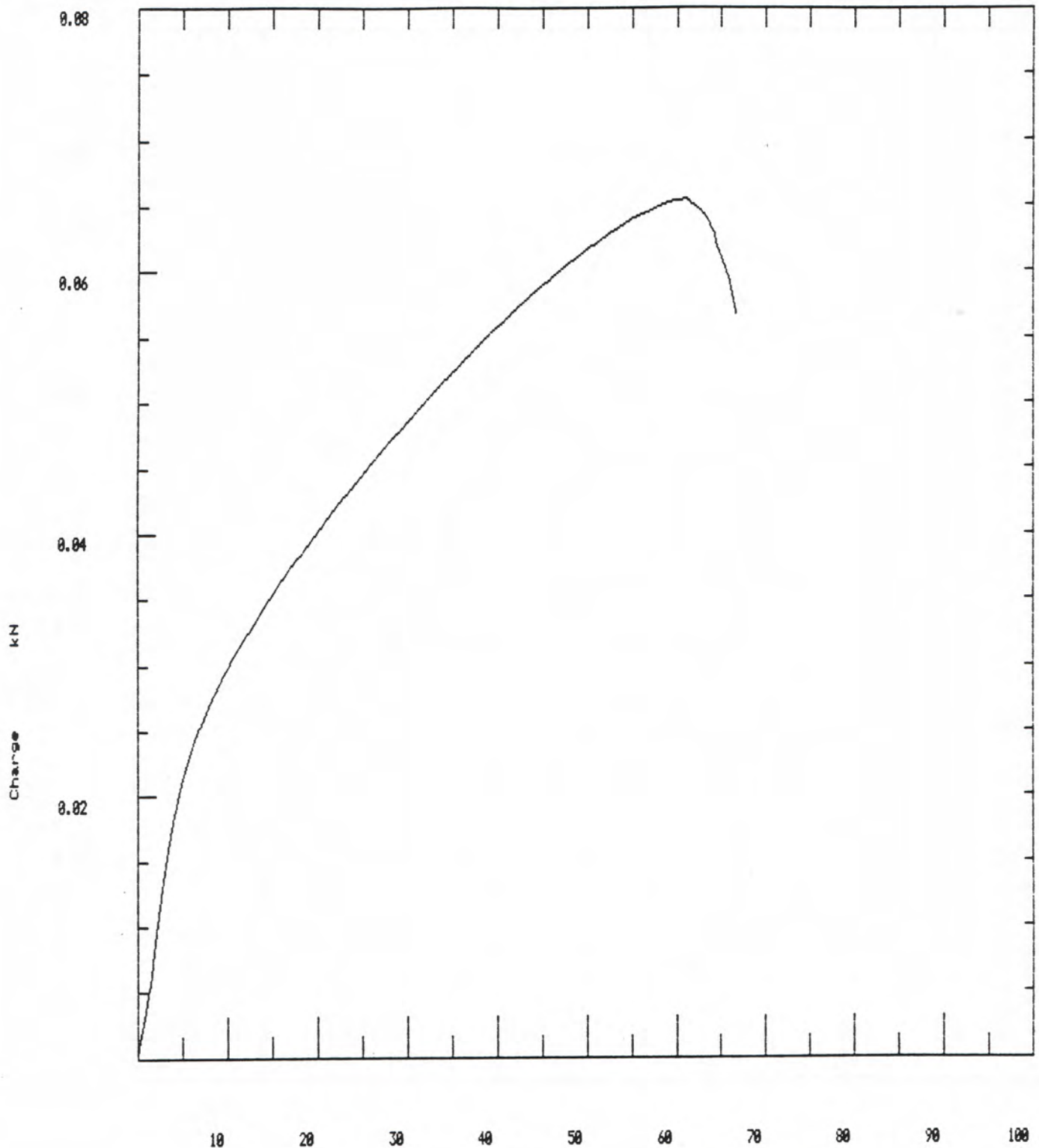
(Instron 4507)

CNAM 292 rue St Martin 75003

CONDITIONS EXPERIMENTALES

Humidité(%) 50
Température(°C) 23

CEREX 202 sens travers



CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES

Largeur (mm): 25
Epaisseur (mm): 0.5
Longueur initiale (mm): 250
Distance entre mors (mm): 180
Nombre d'essais: 6

Déplacement (mm)

PARAMETRES MACHINE

Vitesse d'acquisition (pts/s) 10
Vitesse de la traverse(mm/min) 200

ESSAI DE TRACTION

(Instron 4507)

CNAM 292 rue St Martin 75003

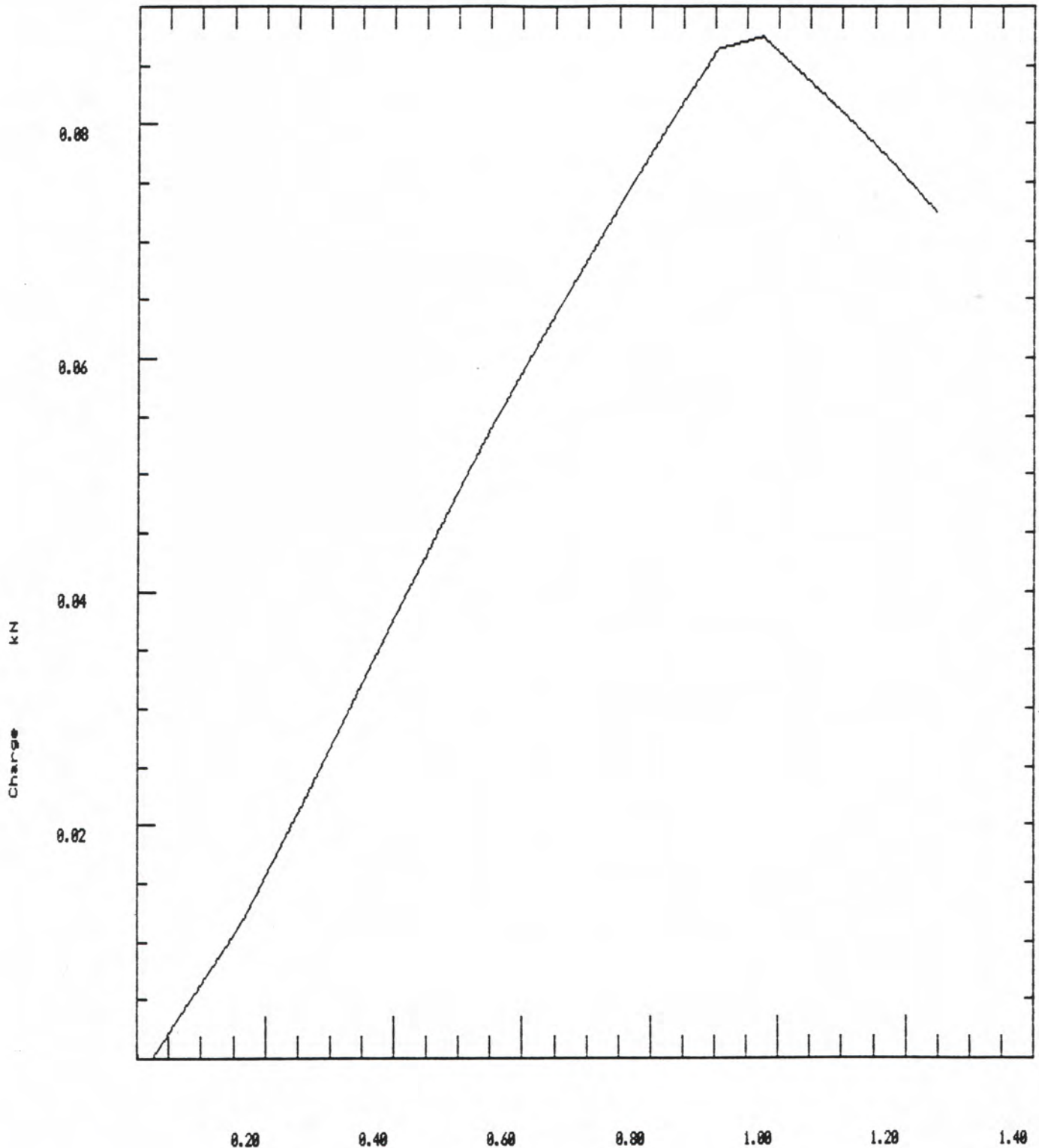
CONDITIONS EXPERIMENTALES

Humidité(%) 50
Température(°C) 23

Papier XIX sens machine

PXIX2

MOYENNE



CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES

Largeur (mm): 25
Epaisseur (mm): 0.5
Longueur initiale (mm): 250
Distance entre mors (mm): 180
Nombre d'essais: 6

Déplacement (mm)

PARAMETRES MACHINE

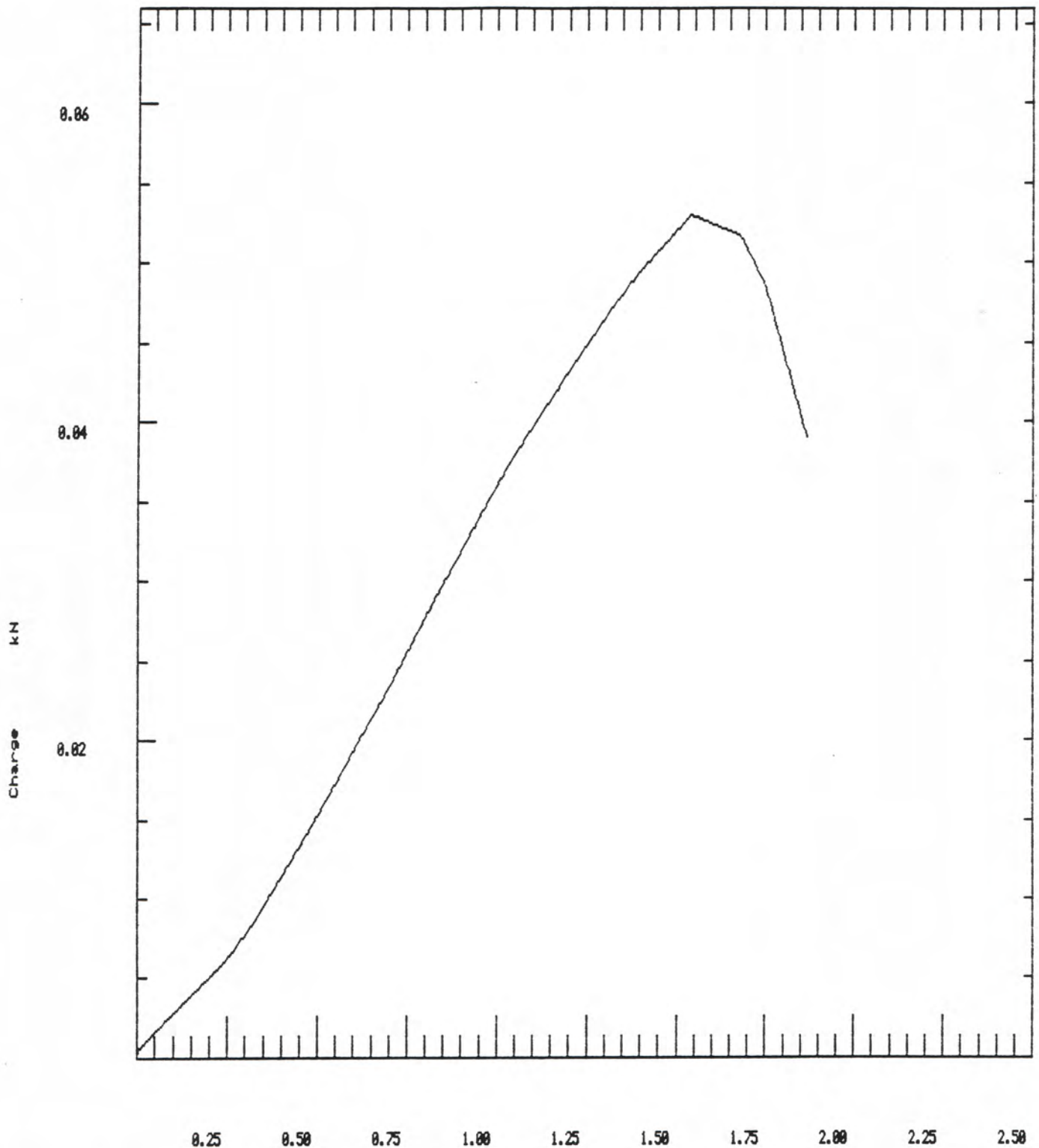
Vitesse d'acquisition (pts/s) 10
Vitesse de la traverse(mm/min) 200

ESSAI DE TRACTION (Instron 4507)

CONDITIONS EXPERIMENTALES

Humidité(%) 50
Température(°C) 23

Papier XIX sens travers



CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES

Largeur (mm): 25
Epaisseur (mm): 0.5
Longueur initiale (mm): 250
Distance entre mors (mm): 180
Nombre d'essais: 6

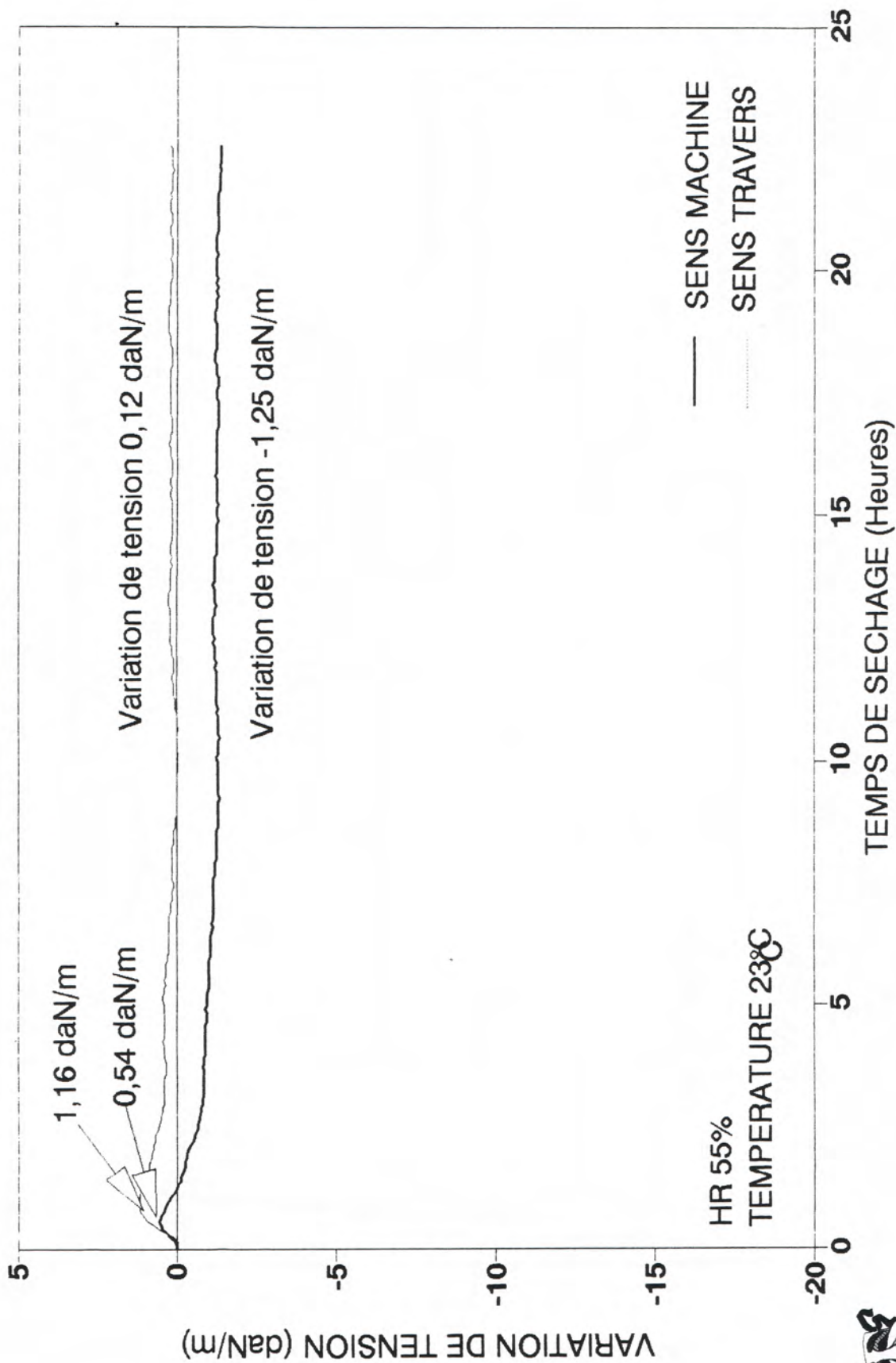
Déplacement (mm)

PARAMETRES MACHINE

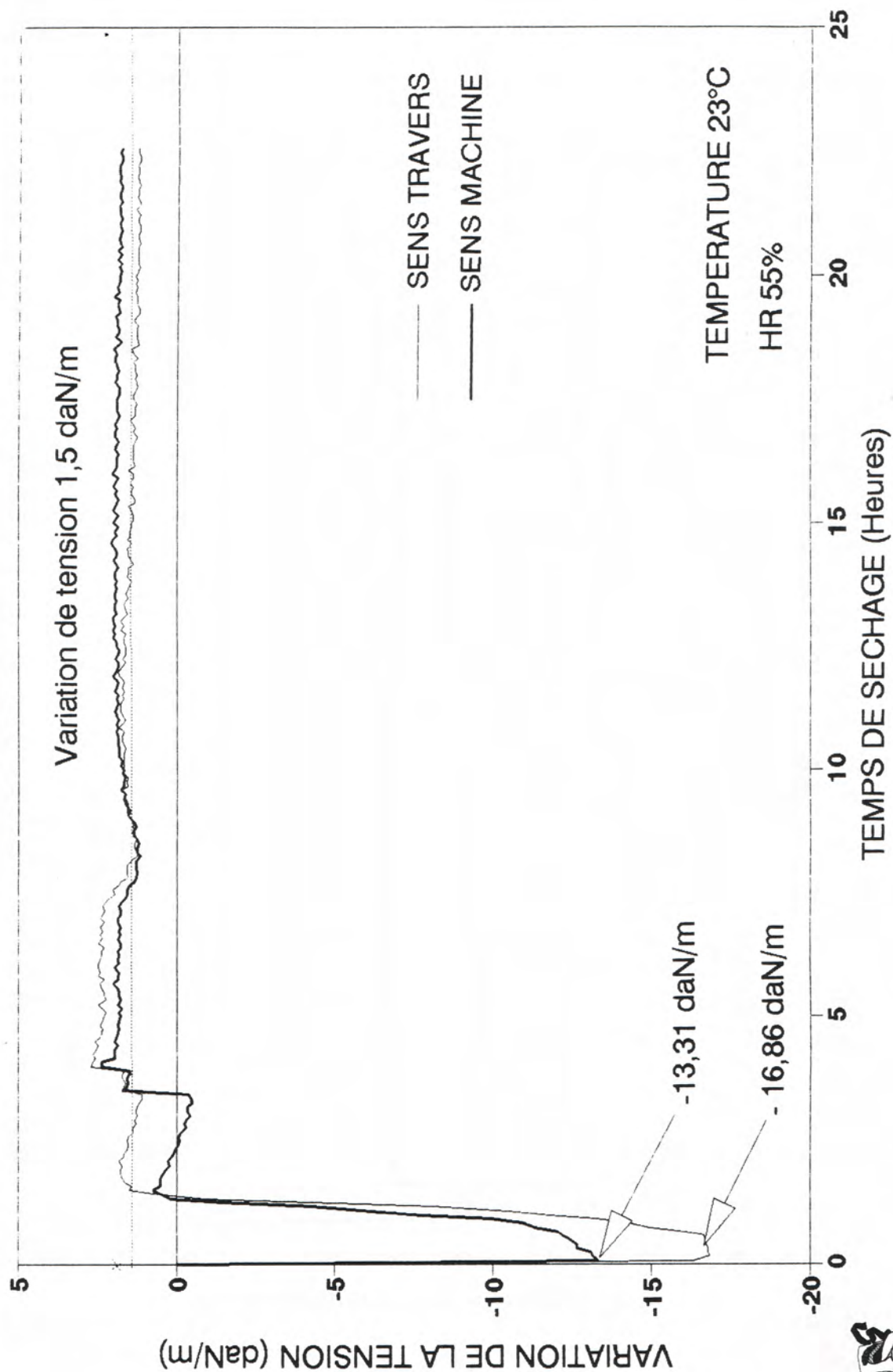
Vitesse d'acquisition (pts/s) 10
Vitesse de la traverse (mm/min) 200

REEMAY 2024

ENCOLLAGE SECHAGE

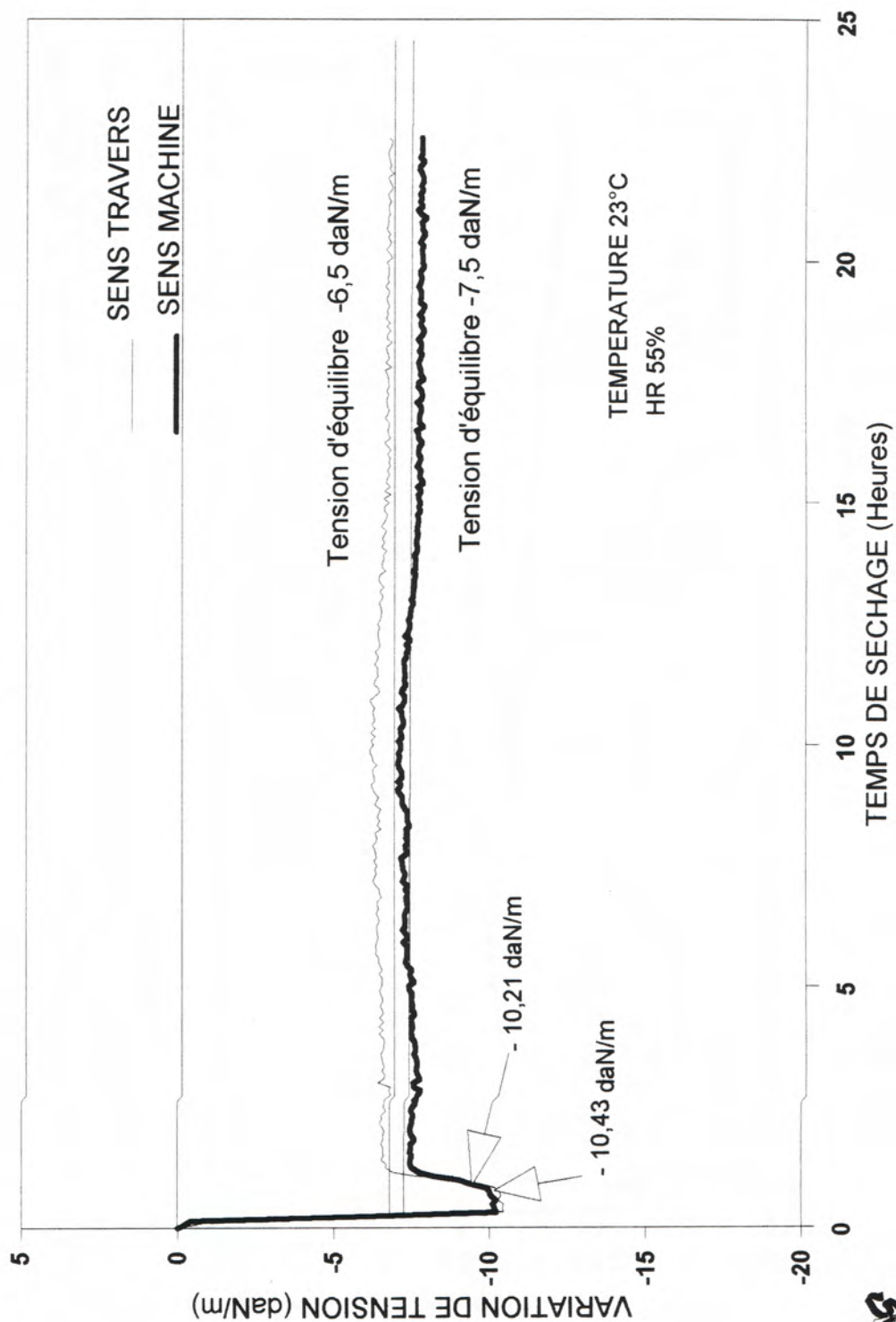


CEREX ENCOLLAGE SECHAGE



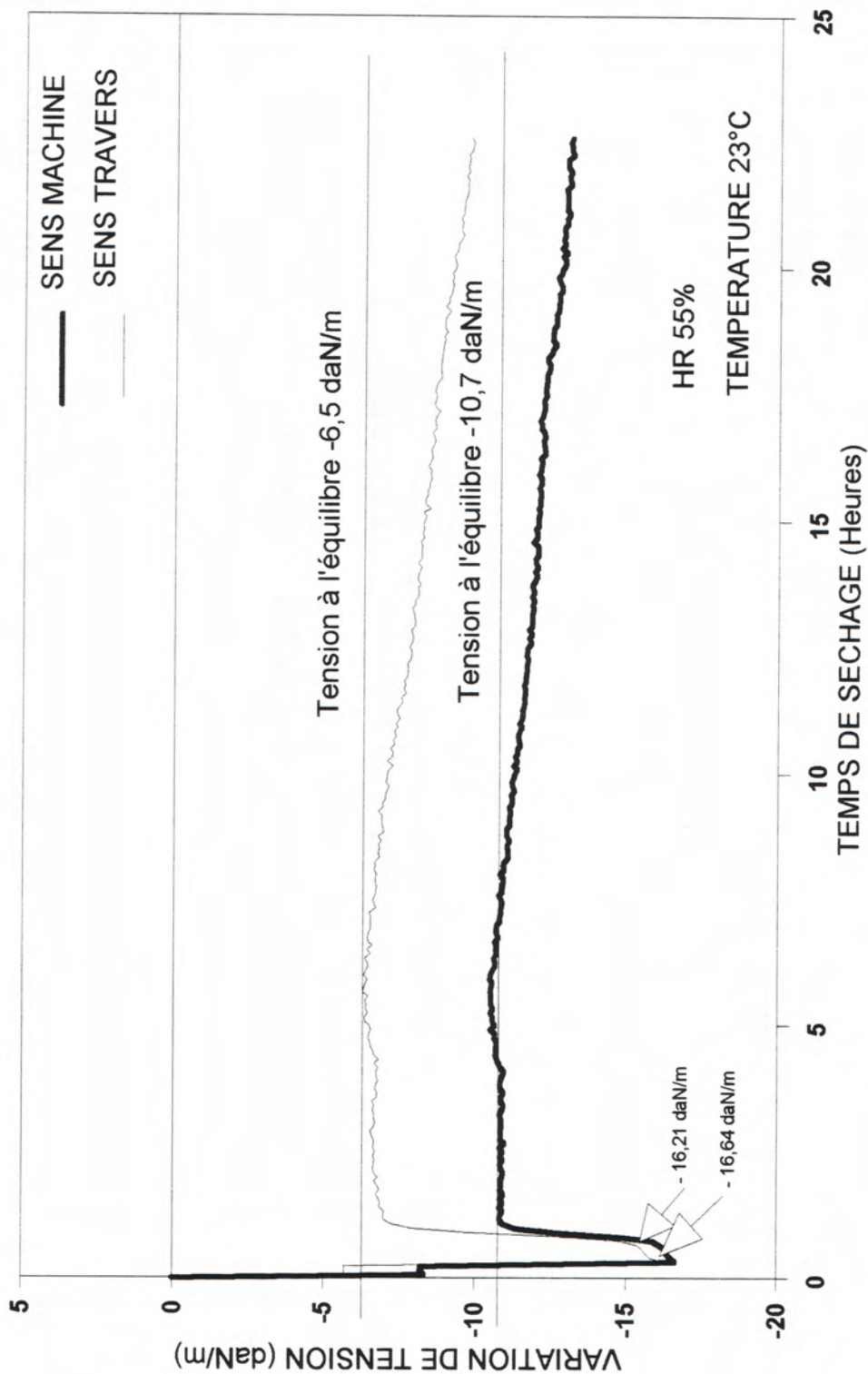
PAPIER JAPON RK17

MOUILLAGE SECHAGE

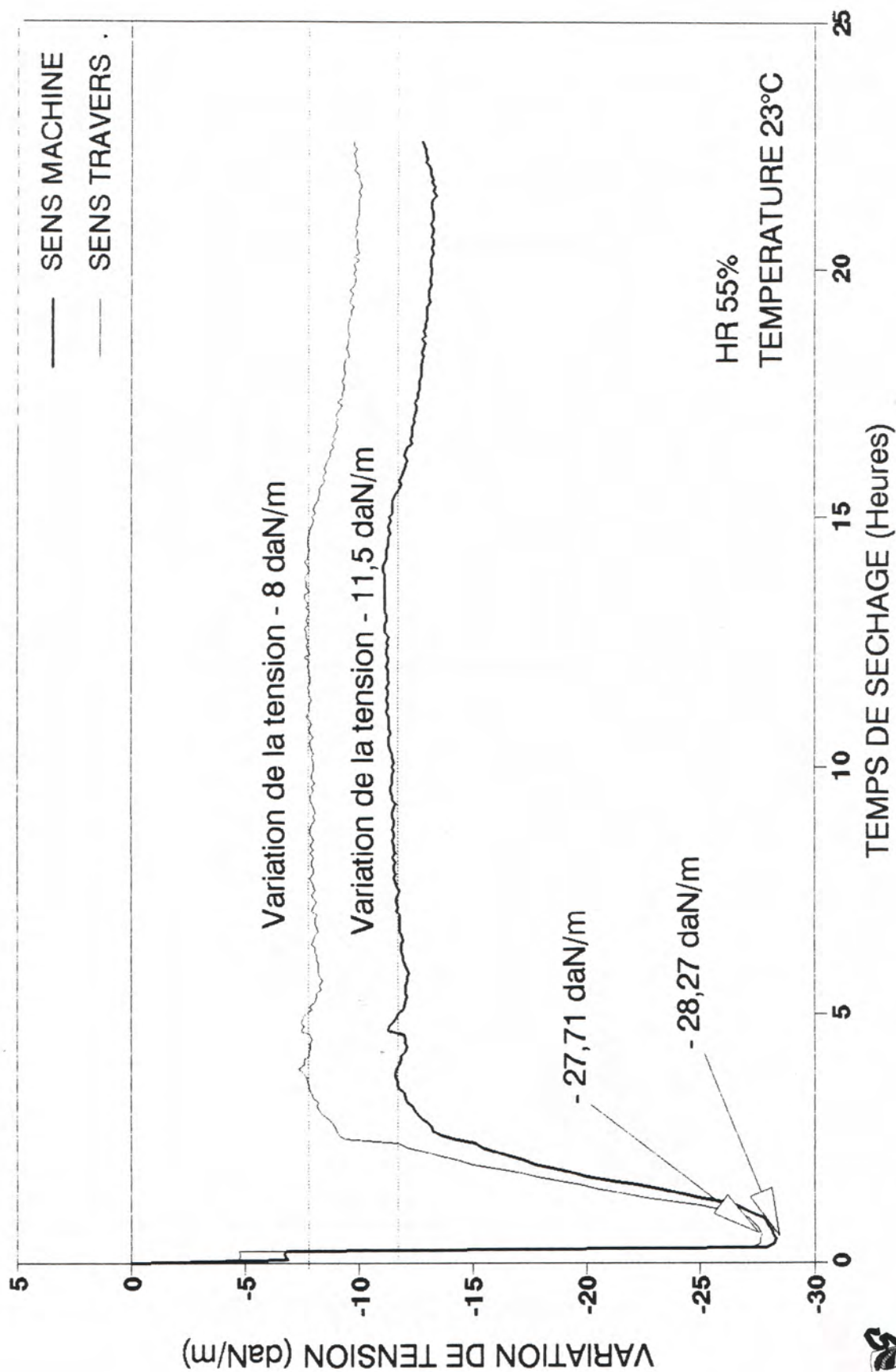


PAPIER RK 19

MOUILLAGE ET SECHAGE

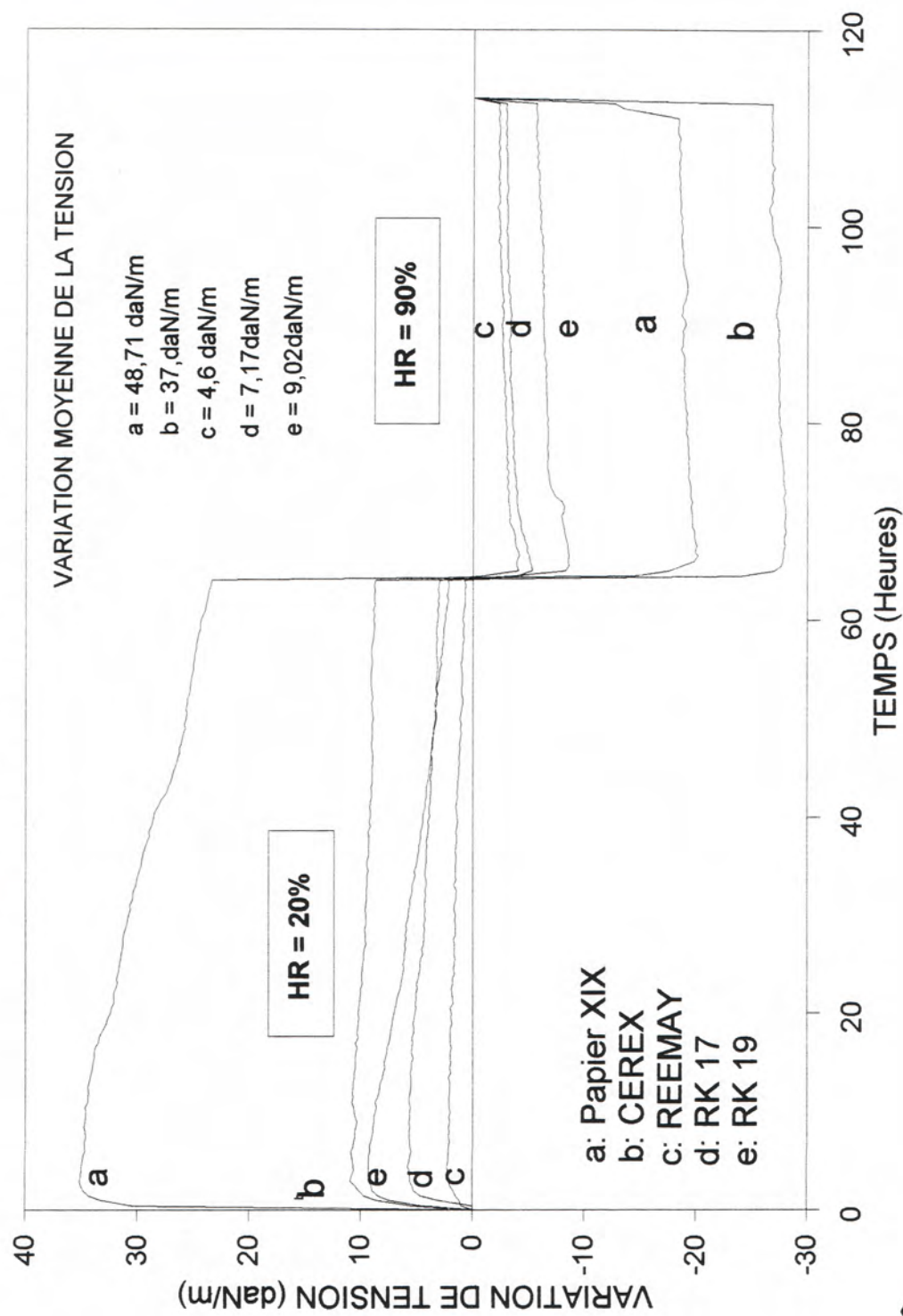


PAPIER D'OEUVRE MOUILLAGE SECHAGE

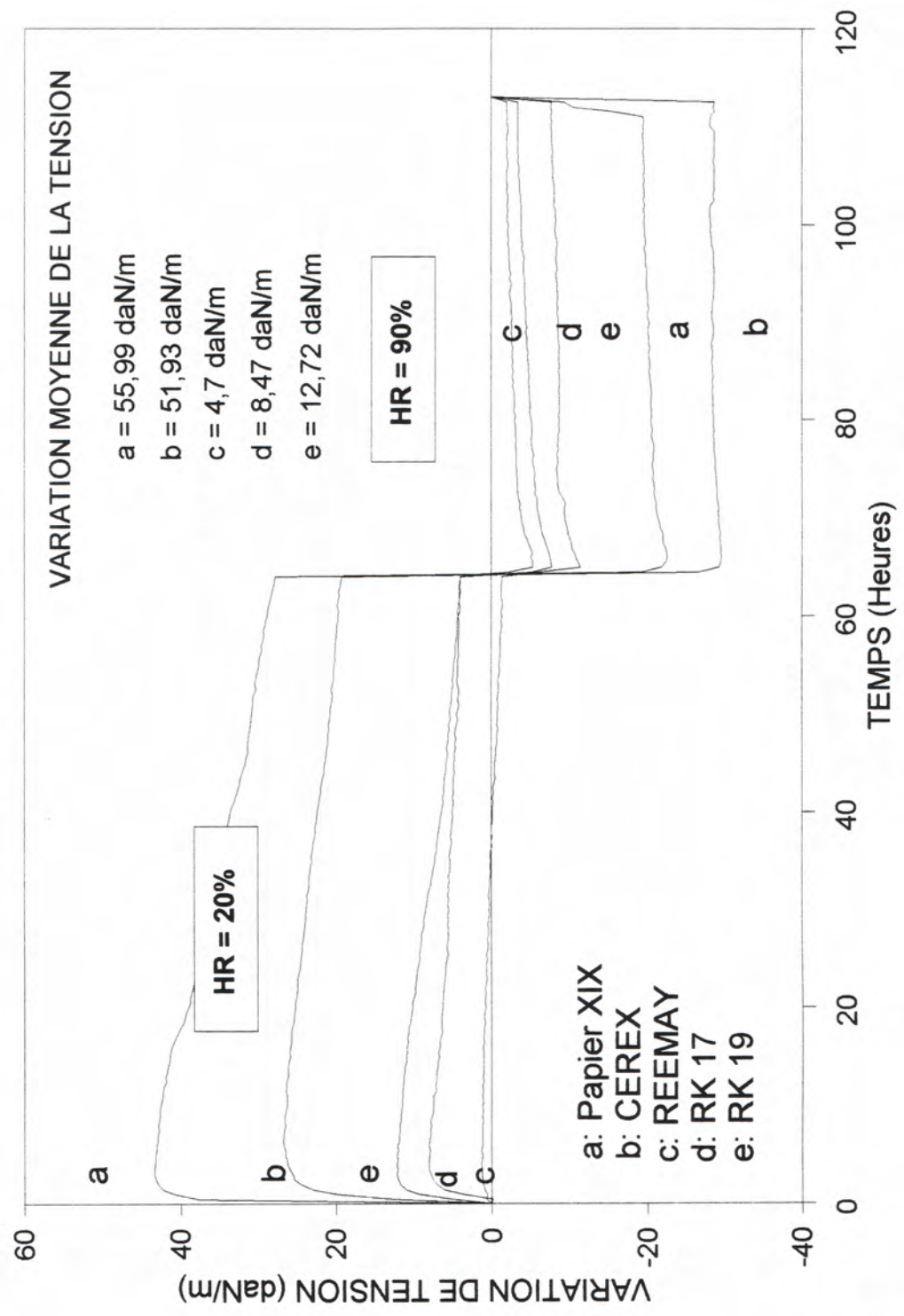


TENSION SENS MACHINE EN FONCTION DE HR

PAPIER XIX, CEREX, REEMAY, RK17, RK19

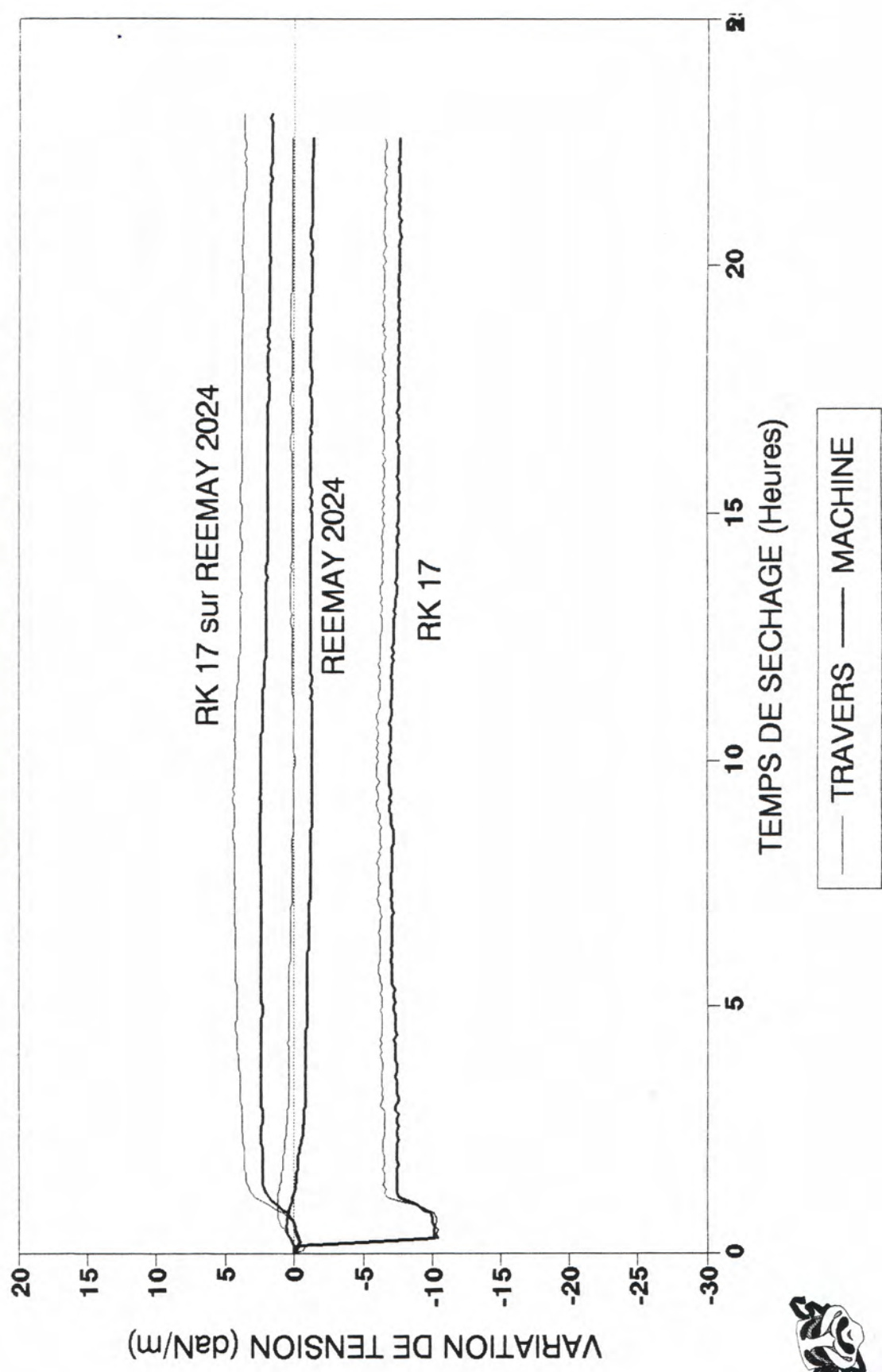


TENSION SENS TRAVERS EN FONCTION DE HR PAPIER XIX,CEREX,REEMAY,RK17,RK19



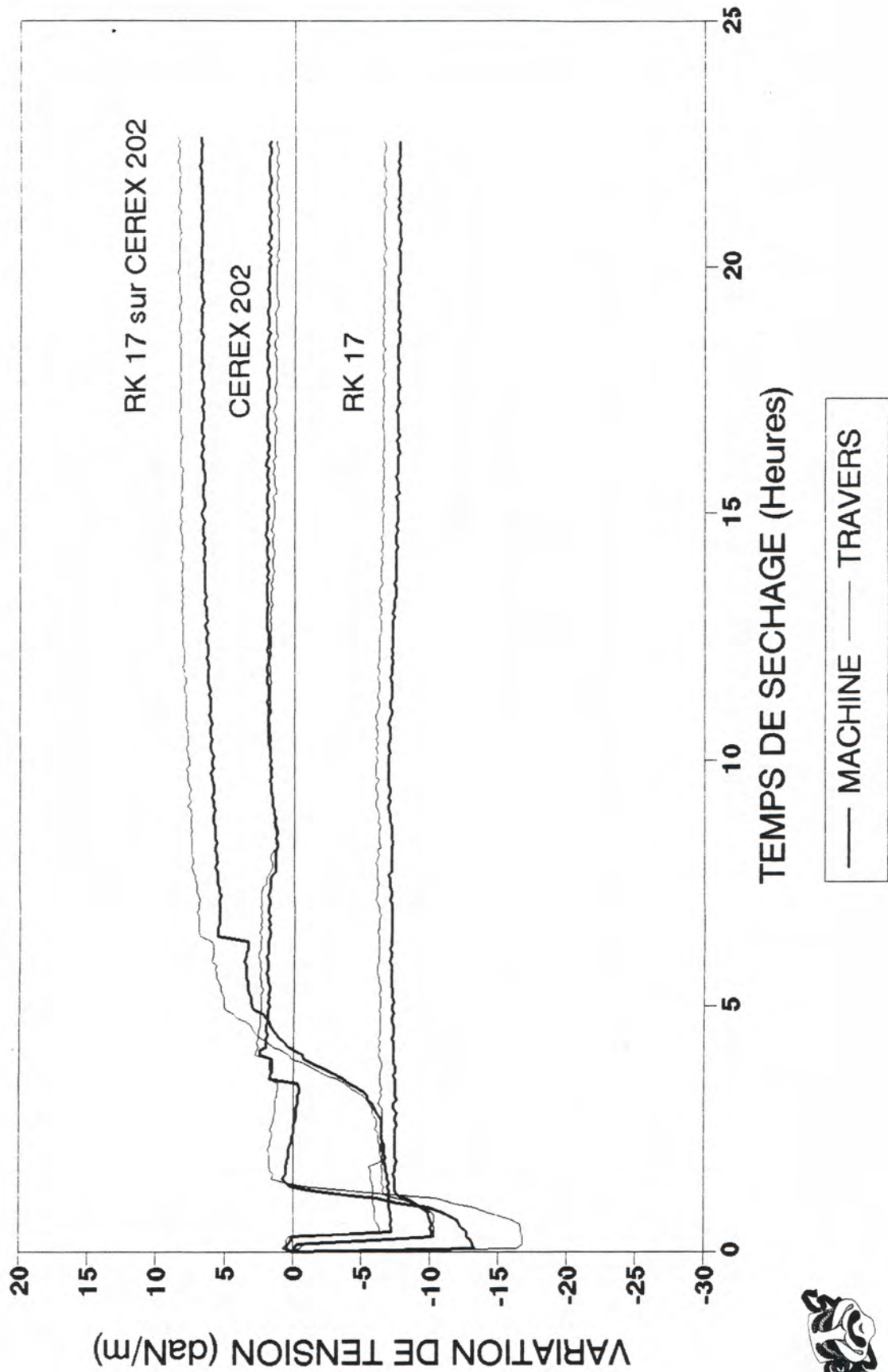
COLLAGE DU RK17 SUR LE REEMAY 2024

Variations de tension vs le séchage



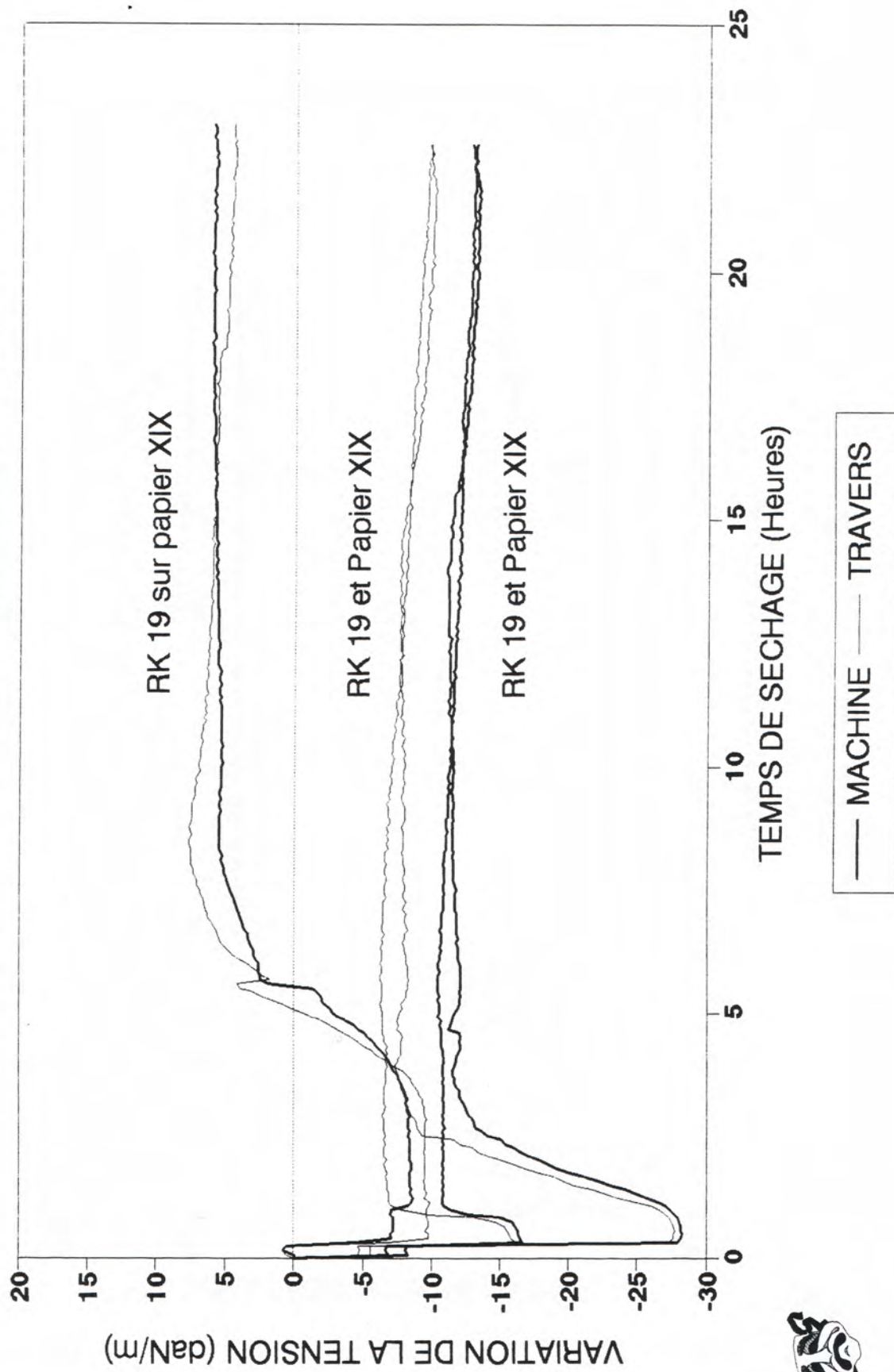
COLLAGE DU RK 17 SUR CEREX 202

Variations de tension vs séchage



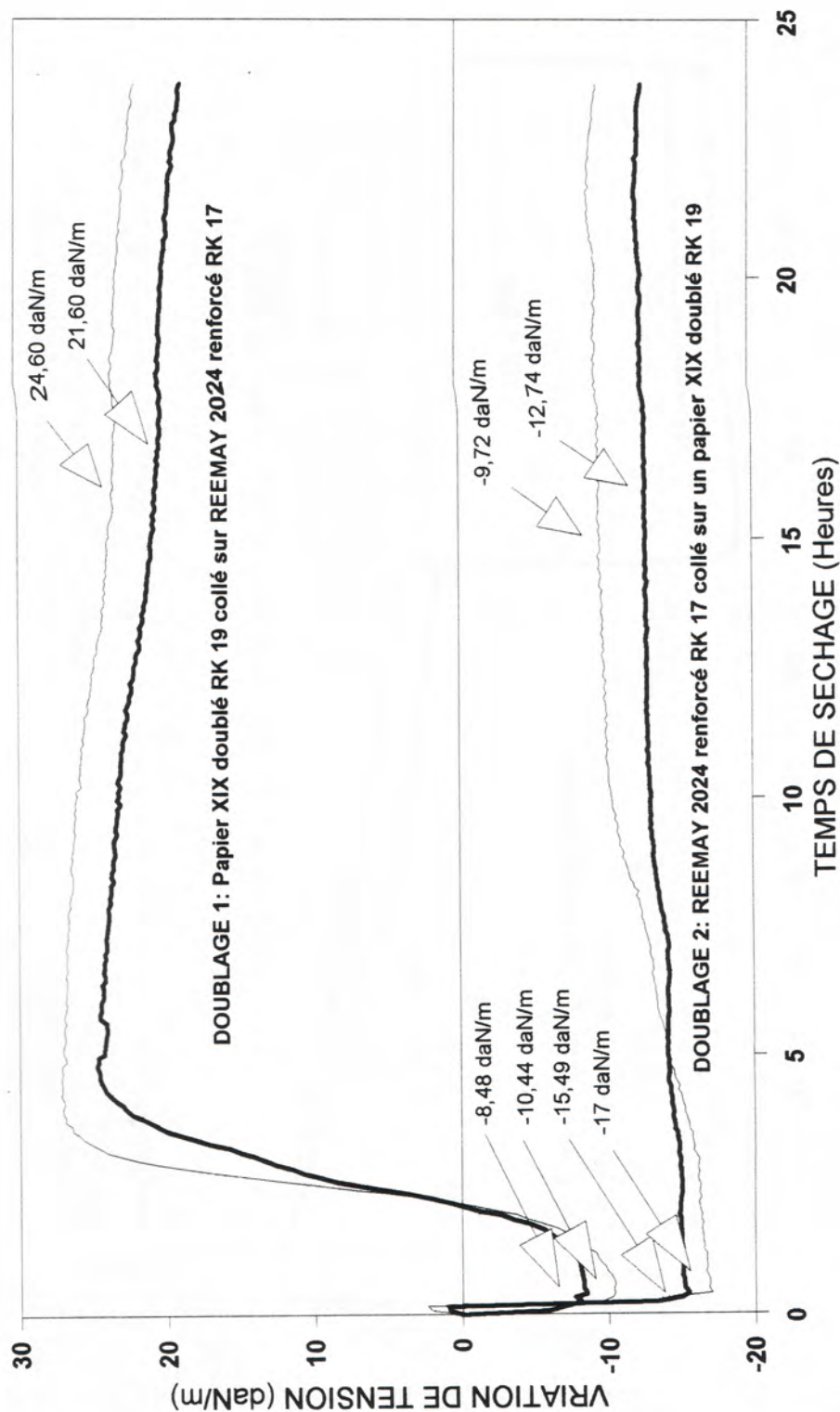
COLLAGE DU RK19 SUR LE PAPIER XIX

Variations des tensions vs le séchage



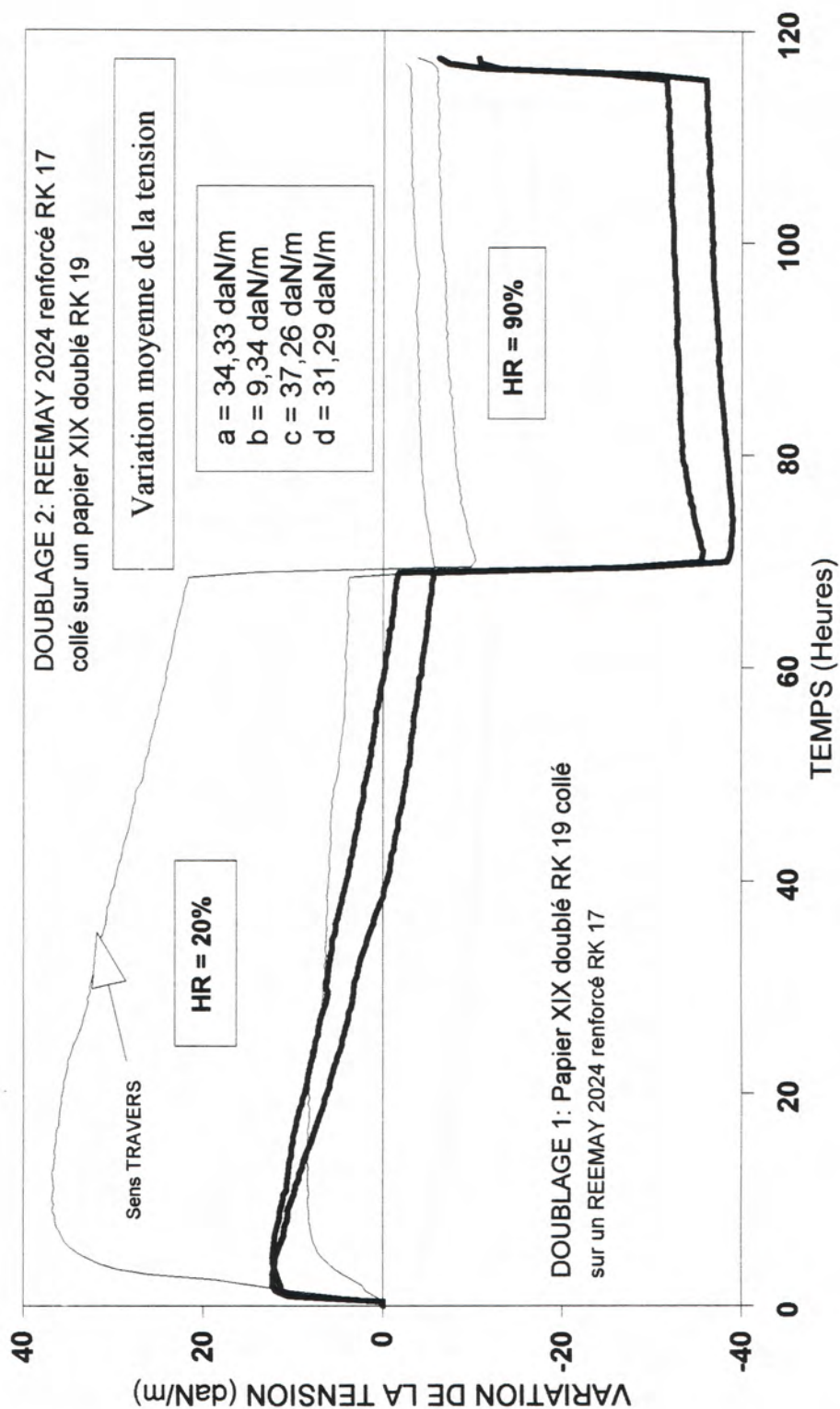
SIMULATION DE DOUBLAGE

Variation des tensions vs le séchage



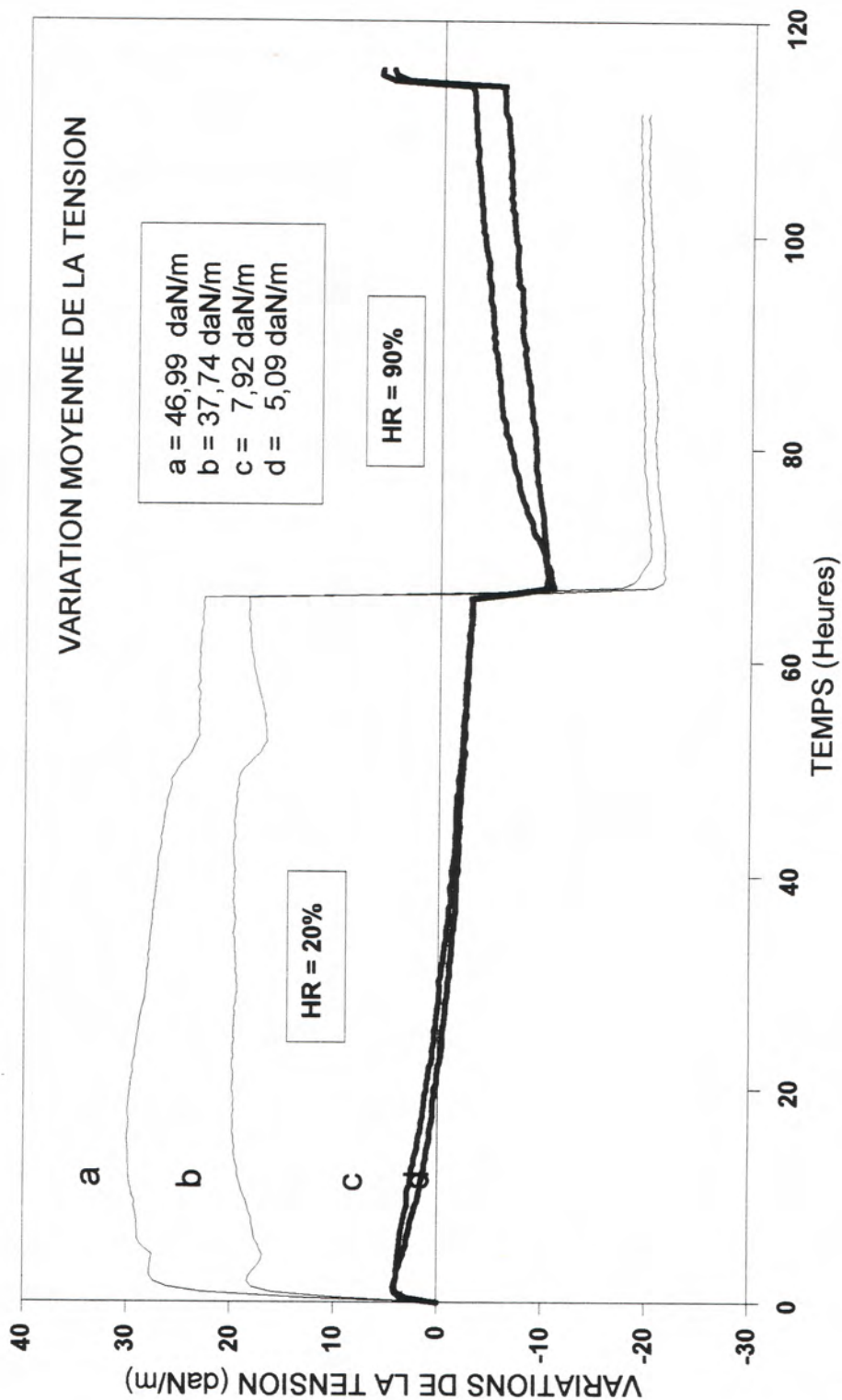
TENSION vs HR

DOUBLAGE 1 et DOUBLAGE 2



TENSION vs HR

RK 17 sur R. 2024 et RK 17 sur C. 202



— RK17/REEMAY 2024 — RK17/CEREX 202

