



INSTITUT  
TECHNOLOGIQUE

# Influence des propriétés mécaniques des films de finition sur la résistance au vieillessement

Rapport final - Etude MECAFINIT

Rédaction : Laurence PODGORSKI, Juin 2023 V2

Financé par

**CODIFAB**

Développement des Industries Françaises  
de l'Ameublement et du Bois

# Sommaire

<b>1</b>	<b>Remerciements</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Contexte et objectif de l'étude MECAFINIT</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Matériels et Méthodes</b> .....	<b>4</b>
3.1	Systèmes de finition étudiés .....	4
3.2	Dureté Persoz .....	6
3.3	Essais de traction .....	6
3.4	Résistance au choc .....	7
<b>4</b>	<b>Résultats</b> .....	<b>7</b>
4.1	Dureté Persoz .....	7
4.2	Epaisseur des films réalisés pour les essais de traction .....	10
4.3	Résultats de traction à température ambiante sur films non vieillis .....	11
4.4	Résultats de traction sur films non vieillis: Influence de la température .....	12
4.5	Résultats de traction à température ambiante sur films vieillis .....	16
4.6	Résistance au choc .....	20
<b>5</b>	<b>Conclusions</b> .....	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Références</b> .....	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>Annexe : Résultats de traction à différentes température pour chaque système de finition (sans vieillissement)</b> .....	<b>26</b>
7.1	Introduction .....	26
7.2	Système 1 -Topcoat .....	26
7.3	Système 1 - Midcoat .....	29
7.4	Système 2 – Topcoat .....	31
7.5	Système 3 – Topcoat .....	33
7.6	Système 3 – Midcoat .....	35
7.7	Système 4 – Topcoat .....	37
7.8	Système 4 - Midcoat .....	39
7.9	Système 5 - Topcoat – Midcoat .....	41
7.10	Système 6 - Topcoat - Midcoat .....	43
7.11	Synthèse des données pour les midcoats .....	45
7.12	Synthèse des données pour les topcoats .....	46

## 1 Remerciements

Nous remercions les différents collaborateurs FCBA ayant contribué à cette étude, et en particulier :

- Daniel IRIBARNEGARAY et Nathan BERGEON pour la réalisation des essais de traction,
- Jean-Denis LANVIN pour l'appui à l'analyse des résultats de traction,
- Céline REYNAUD pour la réalisation des films de finition et leur exposition au vieillissement,
- Dominique MANGIN pour la réalisation des mesures de dureté Persoz et résistance au choc.

Nous adressons aussi nos remerciements aux sociétés Akzo Nobel, Cromology, Masquelack, Milesi, et Obbia pour nous avoir fourni les systèmes de finition testés dans cette étude ainsi qu'au CODIFAB pour son soutien financier.

## 2 Contexte et objectif de l'étude MECAFINIT

Pour protéger efficacement une menuiserie en bois, le système de finition (peinture, lasure) doit être suffisamment souple afin de ne pas développer de craquelage favorisé par les continus retraits-gonflements du bois.

Les critères de performances des finitions extérieures pour bois sont décrits dans la norme NF EN 927-2 (Spécifications de performances). Ils reposent sur des observations visuelles menées sur des éprouvettes ayant été exposées 1 année aux intempéries dans des conditions normalisées (NF EN 927-3, essai de vieillissement naturel). Ces critères visuels incluent le craquelage, l'écaillage, le cloquage. L'adhérence est évaluée ainsi que la perméabilité à l'eau (NF EN 927-5). Parmi les critères visuels, le craquelage est le premier signe de dégradation visible. L'écaillage se produit plus tard et est une conséquence d'un sévère craquelage. Quant au cloquage, il se produit plus rarement et est lié à l'interaction entre une humidité excessive du bois et une faible perméabilité du revêtement. L'apparition de craquelage témoigne a posteriori de propriétés mécaniques de la finition non adaptées au bois, mais ce critère visuel de performance ne permet pas pour autant de comprendre les phénomènes en jeu. Il est donc peu utile à qui veut développer des finitions extérieures pour bois performantes.

L'objectif du projet MECAFINIT est d'étudier les propriétés mécaniques de finitions commerciales utilisées pour protéger les menuiseries en bois afin de mieux comprendre les interactions entre le bois et les produits de finition et les apparitions de craquelage. Le projet propose de mesurer ces propriétés par des tests de traction sur films libres de produits de peinture afin de déterminer la déformation à la rupture, la contrainte de traction et le module d'élasticité. Des mesures de dureté Persoz sur les bois revêtus de finition complètent les investigations.

Le sujet des propriétés de traction des films de produits de peinture est peu documenté. Il fait l'objet de débats au sein du Comité Européen de Normalisation CEN/TC139/WG2 (finitions extérieures pour bois) auquel FCBA participe activement. Au sein de cette instance, les délégués allemands ont rapporté qu'en Allemagne, il y a plusieurs années, les finitions utilisées en menuiserie devaient avoir une déformation à la rupture d'au moins 20%. Cette exigence a depuis été supprimée car personne n'était capable plus d'en connaître son origine, de définir quelles étaient les conditions d'essai associées et notamment la vitesse de l'essai de traction, connue pour influencer sur le résultat.

En Italie, une certification de produits de finitions extérieures pour bois stipulait que la déformation à la rupture devait être supérieure à 50%. Elle précisait aussi qu'après un vieillissement de 2 semaines selon EN 927-6 (test de vieillissement artificiel) la déformation à la rupture ne devait pas être réduite de plus de 20% de sa valeur initiale.

Une déformation à la rupture supérieure à 50% est-elle suffisante pour qu'une finition résiste au développement de craquelage ? Quelle est l'influence de l'exposition aux intempéries sur la déformation à la rupture ? La déformation à la rupture est-elle le seul critère de performance dont il faut tenir compte parmi les propriétés de traction ? Quelle est l'influence du module élastique de la finition ? L'objectif de l'étude MECAFINIT est de répondre à ces questions.

### 3 Matériels et Méthodes

#### 3.1 Systèmes de finition étudiés

Six systèmes de finitions commerciaux utilisés en France pour la protection des menuiseries bois ont été étudiés. Cinq fabricants de peinture les ont fournis (Akzo Nobel, Cromology, Masquelack, Milesi, Obbia). Tous les systèmes de finitions étaient en phase aqueuse et appliqués conformément aux recommandations des fabricants sur les essences de bois pour lesquelles ils ont été conçus (Tableau 1). Ces 6 systèmes de finition sont identiques à ceux de l'étude CODIFAB PREDIFIMEX<sup>1</sup> financée par le CODIFAB qui évalue la performance des systèmes sur différents sites de vieillissement en France et pour différentes conceptions de châssis de fenêtres bois.

Les systèmes de finition 1, 2, 3 et 4 se composaient d'un primaire, d'une couche intermédiaire et d'une couche de finition. Pour les systèmes de finition 5 et 6, trois couches ont été appliquées, la première couche étant diluée avec  $\pm 10\%$  d'eau selon les recommandations du fabricant. Les applications des systèmes de finition ont été réalisés par les fabricants de finition sur des éprouvettes en bois normalisés pour les essais de vieillissement réalisés dans le cadre de l'étude PREDIFIMEX. Ces systèmes ont aussi été appliqués par les fabricants sur des petits châssis de menuiserie (voir étude PREDIFIMEX).

Référence système	Opacité/couleur	Essence de bois
1	Opaque / Blanc	Chêne
2	Opaque / RAL 7016	Pin sylvestre
3	Opaque / Blanc	Chêne
4	Semi-transparent / Brun	Chêne
5	Semi-transparent / Brun	Pin sylvestre
6	Opaque / Blanc	Pin sylvestre

Tableau 1 : description des systèmes de finition utilisés dans l'étude

Grâce à l'étude CODIFAB PREDIFIMEX, les performances de ces 6 systèmes de finition sont connues, notamment via des essais de vieillissement naturel (EN 927-3) sur 4 sites géographiques : Brest, Champs sur Marne, Toulon, Bordeaux. La Figure 2 montre le développement du craquelage des éprouvettes revêtues des 6 systèmes de finition et exposées sur le site de Bordeaux à 45° face au sud durant 3 ans minimum. Elle fait également figurer en rouge les spécifications de performance pour les catégories stable, semi-stable, non-stable de la norme EN 927-2. Après 3 ans de vieillissement, seuls deux systèmes de finition respectent la spécification de performance d'un craquelage inférieur à 0.7 pour la catégorie stable (performance exigée pour la menuiserie), à savoir le système 1 et le système 6 qui n'ont présenté aucun craquelage. Le craquelage, développé sur les autres systèmes, les classent dans la catégorie semi-stable (système 2) et non-stable (systèmes 3, 4 et 5). C'est le système 5 qui a développé le plus de craquelage, et ce dès la première année de vieillissement.

<sup>1</sup> Etude PREDIFIMEX : Appréciation des durées de vie des finitions selon exposition & conception fenêtres bois (2018-2023) – Financement CODIFAB. Coordination et réalisation FCBA.

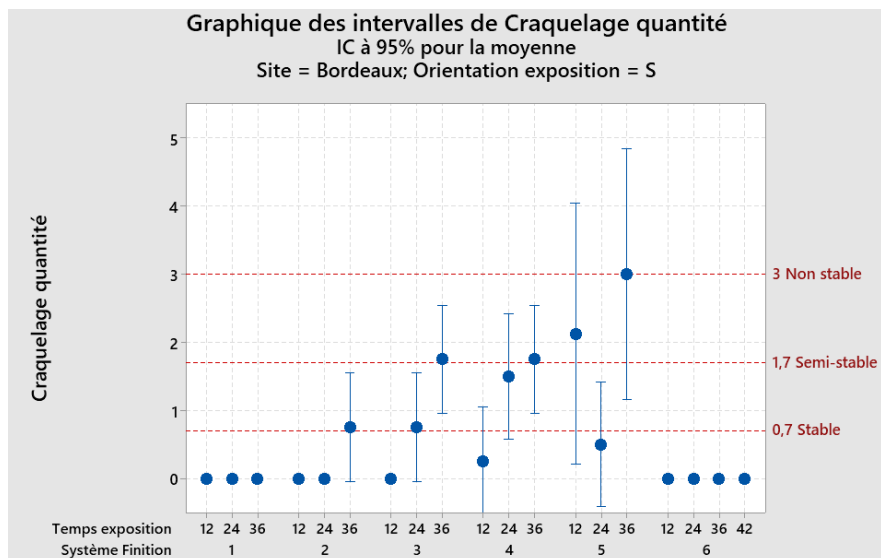


Figure 1 : Résultats de craquelage sur éprouvettes en fonction du temps d'exposition (en mois) - site de Bordeaux, exposition 45° face au Sud

Les éprouvettes exposées à Bordeaux, à 45° face au nord, ont développé moins de craquelage qu'au sud, comme la Figure 2 le montre. Pour cette exposition, ce sont à nouveau les systèmes 1 et 6 qui n'ont pas présenté de craquelage et qui respectent donc la limite de spécification de 0.7. Tous les autres systèmes se placent dans la catégorie semi-stables car ils présentent un craquelage moyen entre 0.7 et 1.7.

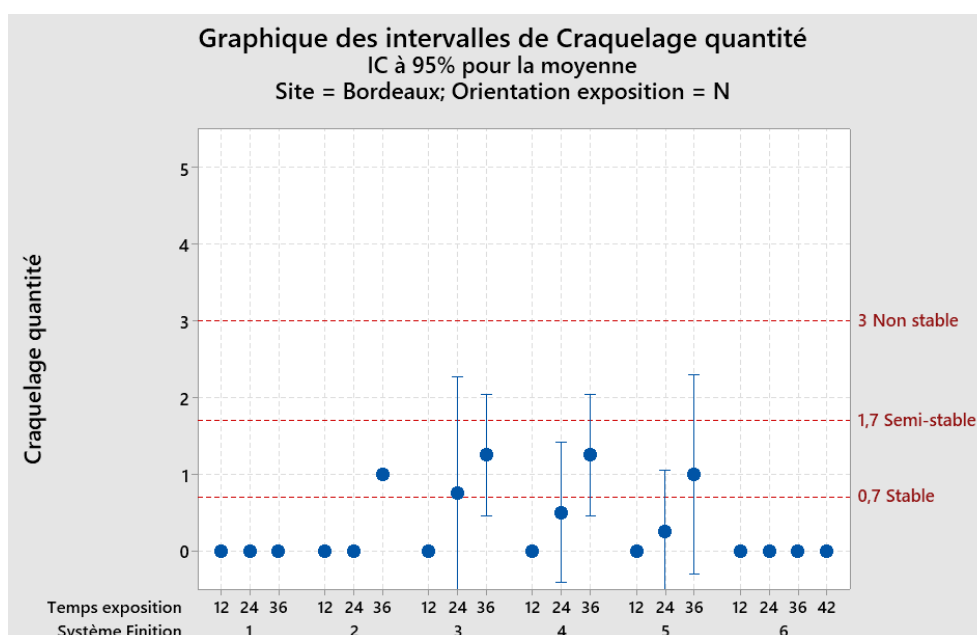


Figure 2 : Résultats de craquelage sur éprouvettes en fonction du temps d'exposition (en mois) - site de Bordeaux, exposition 45° face au Nord

La Figure 3 synthétise le développement de craquelage moyen des éprouvettes exposées face au sud pour l'ensemble des 4 sites d'exposition. Elle confirme la meilleure performance des deux systèmes 1 et 6, dont le craquelage est bien en deçà de la limite de spécification pour tous les sites. Le système 5 est celui qui développe le craquelage le plus important (supérieur à 3).

Tous sites confondus, sur la base du critère craquelage, le classement des systèmes est le suivant (du plus performant au moins performant) :

$$1 - 6 > 3 > 2 - 4 > 5$$

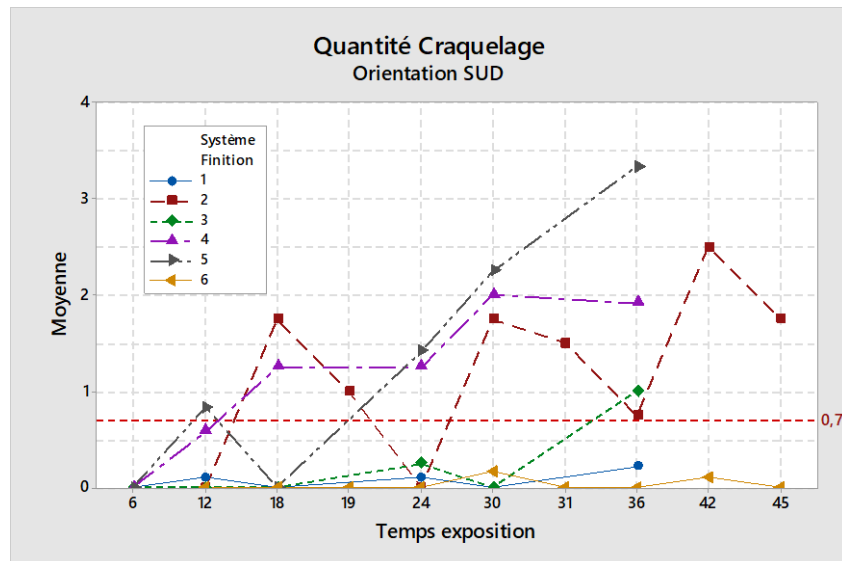


Figure 3 : Résultats de craquelage en fonction du temps d'exposition (en mois) – Tous sites confondus, exposition 45° face au sud

### 3.2 Dureté Persoz

La dureté Persoz est généralement mesurée pour les revêtements intérieurs, car une certaine dureté est requise en particulier pour des applications telles que les parquets. La dureté Persoz est rarement mesurée pour les revêtements extérieurs en bois, probablement parce que la dureté n'est pas une propriété souhaitée pour ces applications, qui nécessitent plutôt des revêtements souples. Pourtant le pendule de Persoz s'est révélé être une méthode pratique pour évaluer la dureté des revêtements extérieurs en bois comme l'ont montré les travaux de thèse de Lise Malassenet co-dirigée par FCBA (Malassenet *et al.* 2015).

La dureté Persoz est mesurée à l'aide d'un pendule qui oscille sur les revêtements et dont on mesure le temps d'amortissement. Ce temps d'amortissement du pendule définit la dureté dite de Persoz, exprimée en secondes. Plus le temps d'amortissement est long, plus le revêtement est dur. La norme EN ISO 1522 recommande de mesurer la dureté de Persoz sur les revêtements appliqués sur des plaques de verre. Cependant, la formation du film des revêtements peut être différente sur le bois par rapport au verre, car certaines substances extractives du bois peuvent influencer la formation du film (Grüll *et al.* 2014, Mauguère-Guyonnet *et al.* 2004). Malassenet *et al.* (2015) ont montré que la mesure de la dureté Persoz des revêtements appliqués sur des échantillons de bois était pertinente et n'était pas influencée par les substrats en bois. De plus, la mesure de la dureté directement sur les échantillons de bois permet d'étudier les variations de dureté lorsque ces échantillons de bois revêtus ont été exposés aux intempéries. Pour chaque système de finition étudié, la dureté Persoz a été mesurée (15 valeurs par système de finition obtenues sur 3 éprouvettes de répliques) après 2 semaines de séchage à  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  et  $(65 \pm 5)\%$  d'humidité relative.

### 3.3 Essais de traction

Des essais de traction ont été réalisés pour toutes les couches de finition (topcoat) les couches intermédiaires (midcoat) des six systèmes de finition (tableau 1), à l'exception du midcoat du système 2, pour lequel il a été difficile d'obtenir des films libres.

Les films libres de finition ont été préparés conformément à la norme EN 927-14. Une étude préliminaire de différents supports a été menée afin d'aboutir à des films de quantité et qui soient facilement décollables de leur support. Pour cela, deux finitions « modèles » ont été utilisées, l'une en phase aqueuse, l'autre en phase solvant. Différents supports ont été testés (plaque de silicone, papier kraft paraffiné, plaque de polyéthylène, panneau de coffrage, papier calque, papier sulfurisé, feuille de polypropylène, plaque de téflon, etc.) ainsi que différentes épaisseurs de finitions et différentes vitesses de déplacement du tire-film. Selon les supports utilisés les qualités de films ont été très variables. Les plaques de polyéthylène ont finalement été retenues pour la suite des investigations.

Les films ont été séchés pendant deux semaines dans une chambre climatique régulée à  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  et  $(65 \pm 5)\%$  d'humidité relative. Les films ont ensuite été soigneusement détachés à la main et découpés à la taille (70 mm x 15 mm) à l'aide d'un emporte-pièce. Les échantillons ont été orientés longitudinalement par rapport à la direction

de préparation du film. Les échantillons ont été conditionnés à  $(20 \pm 2)$  °C et  $(65 \pm 5)$  % d'humidité relative pendant deux semaines supplémentaires avant d'être testés. Les essais de traction ont été réalisés à FCBA à l'aide d'une machine universelle de traction équipée d'une cellule de charge de 100 N. Les éprouvettes de film ont été maintenues à l'aide d'une tige en acier inoxydable. Les éprouvettes de film ont été maintenues par des supports de type mandrin afin d'éviter d'endommager les films en les coupant près des mors. La longueur de la jauge utilisée correspondait à la distance du film libre entre les mors et était fixée à 50 mm. La vitesse de l'actionneur a été fixée à 10 mm/min. Le module d'élasticité a été déterminé comme la pente de la partie linéaire de la courbe résistance-déformation. Un minimum de cinq répétitions a été réalisé pour chaque revêtement. Les valeurs moyennes ont été calculées pour le module élastique, la déformation à la rupture et la résistance à la traction à la charge maximale.

Des films libres de revêtements ont été exposés au vieillissement naturel (45° Sud, site de FCBA Bordeaux) pendant 1 an et au vieillissement artificiel (cycle EN 927-6) pendant 2016 heures. Leurs propriétés mécaniques (déformation à la rupture, module d'élasticité, résistance à la traction) ont été mesurées après exposition aux intempéries.

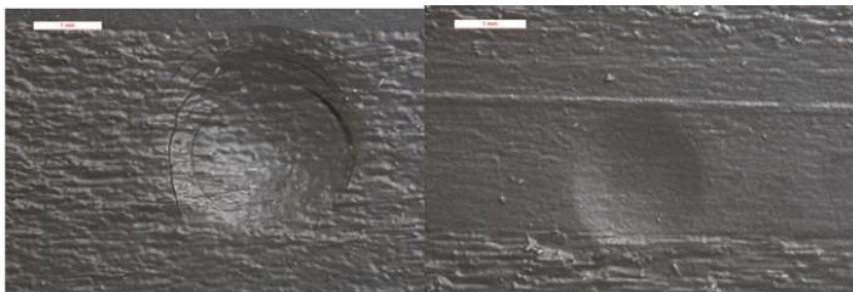
L'influence de la température sur les propriétés de traction des films de finition a été étudiée. Pour cela, les essais de traction ont été menés à trois températures d'essai : -10°C, 20°C, 45°C. Pour quelques produits de finition, des essais ont également été menés à 70°C à la demande du Comité de Pilotage de l'étude afin de reproduire l'effet de température élevée rencontré sur les menuiseries en particulier sur les teintes sombres.

### 3.4 Résistance au choc

Des essais de résistance au choc ont été réalisés. L'objectif était de répondre à la question suivante que certains industriels de la finition ont soulevée : une finition souple n'est-elle pas fragile aux chocs ?

Les essais ont été menés selon la norme EN 438-2 qui mesure la résistance au choc d'une bille de petit diamètre. Un percuteur avec une bille d'acier de 5 mm de diamètre est utilisé : la bille est projetée contre la surface à étudier grâce à un ressort comprimé. La compression du ressort avant relâchement peut être réglée entre 0 et 90 N. On détermine la force maximale pour laquelle aucune fissure apparaît sur le revêtement.

A titre d'exemple, les photos ci-dessous montrent à gauche une finition pour laquelle la force utilisée a généré de la fissuration comparativement à la photo de droite où la force n'a pas généré de fissuration.



## 4 Résultats

### 4.1 Dureté Persoz

La Figure 4 montre que la dureté Persoz moyenne des six systèmes de finitions commerciales était très différente et variait de 50 secondes (système 1) à 118 secondes (système 4). Les systèmes 1 et 6 avaient une dureté similaire et affichaient les valeurs les plus basses (50 et 55 secondes respectivement). En revanche, les systèmes de finition 2 et 4 présentaient les duretés les plus élevées (113 et 118 secondes respectivement). La dureté des systèmes 3 et 5 se situait entre les deux (80 et 89 secondes respectivement).

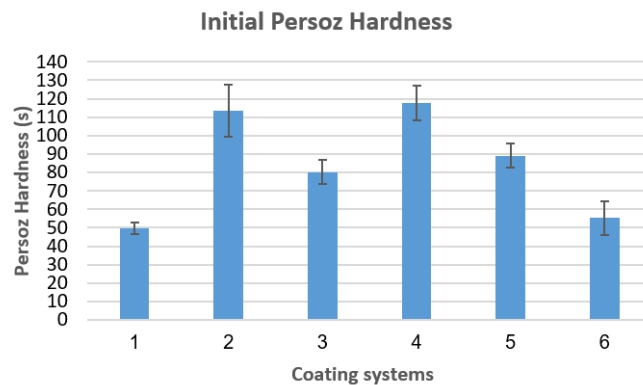


Figure 4 : Dureté Persoz moyenne des 6 systèmes de finition sur bois avant vieillissement

La quantité moyenne de craquelage (ISO 4628-4) après 12 semaines de vieillissement artificiel (Figure 5) était très différente selon les systèmes de finition. Deux d'entre eux étaient exempts de craquelage (systèmes 1 et 6). Les autres systèmes présentaient des craquelages variant de 0,5 (système 3) à 4 (système 4). La quantité de fissuration la plus élevée (craquelage 4) concernait le système de finition 4, qui était le système présentant la dureté Persoz la plus élevée (118 secondes). Les systèmes de revêtement exempts de craquelage étaient ceux qui présentaient la dureté Persoz la plus faible (systèmes de finition 1 et 6).

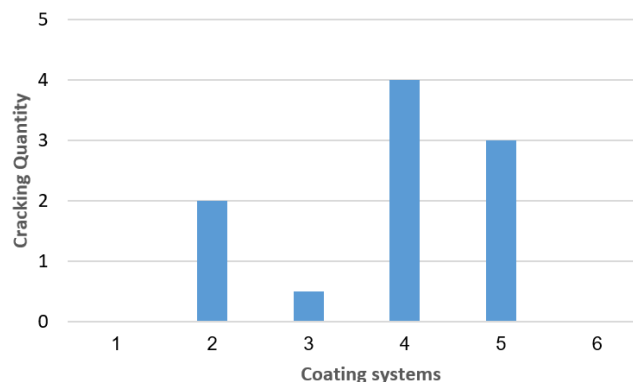


Figure 5 : Quantité moyenne de craquelage (ISO 4628-4) après 12 semaines de vieillissement artificiel (EN927-6)

En ce qui concerne la dureté Persoz (avant vieillissement), le classement des systèmes de finition (de la dureté la plus faible à la plus élevée) était le suivant :

systèmes de finition 1-6 < 3 < 5 < 2 < 4

En considérant le craquelage après 2016 h de vieillissement (EN 927-6), le classement des systèmes de finition (de la quantité de craquelage la plus faible à la plus élevée) était le suivant :

systèmes de finition 1-6 < 3 < 5 < 2 < 4

Les deux classements sont en bon accord, comme le montre également la Figure 6, qui représente la dureté Persoz en fonction du craquelage (vieillissement artificiel) en utilisant toutes les valeurs individuelles pour les six systèmes de finition.



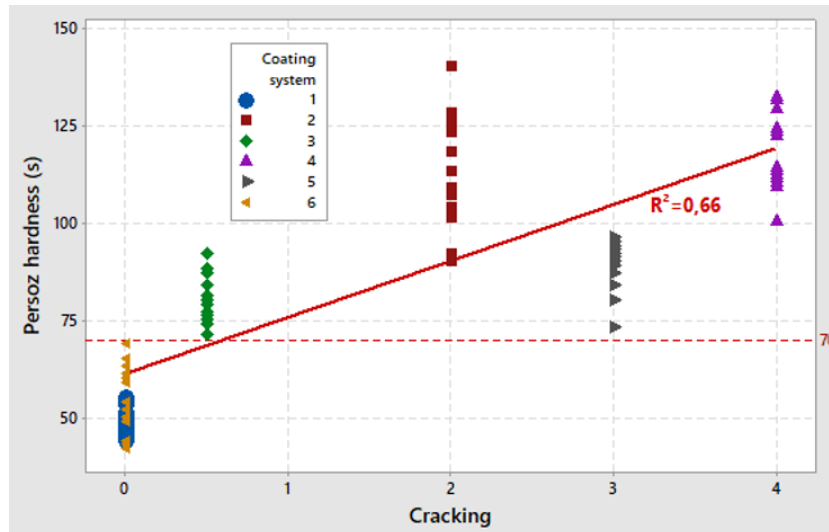


Figure 6 : Dureté Persoz (valeurs individuelles) des 6 systèmes de finition versus la quantité de craquelage après 2016 h de vieillissement artificiel

Cette Figure 6 démontre que les revêtements dont la dureté Persoz initiale était supérieure à 70 secondes étaient sujets au développement de craquelage.

Il a déjà été montré que l'exposition aux intempéries entraînait une modification de la dureté Persoz de toutes les finitions extérieures pour bois (Malassenet *et al.* 2015, Podgorski *et al.* 2016, Podgorski 2019), avec une tendance générale des finitions à devenir plus dures. D'autres auteurs ont utilisé l'analyse mécanique dynamique sur des films de revêtement avant et après l'exposition aux intempéries et ont conclu que l'exposition rendait le film plus rigide (Bulian *et al.* 2004). D'une manière générale, ces changements peuvent probablement être attribués à la réticulation ultérieure du liant et à la lixiviation possible de certaines substances résiduelles telles que les coalescents, les solvants et l'eau agissant comme plastifiants dans les revêtements non exposés.

Le vieillissement artificiel a été étendu à 24 et 36 semaines de vieillissement artificiel (EN 927-6) pour les systèmes de revêtement sans craquelage (systèmes de finition 1 et 6) ou avec de faibles scores de craquelage (système de finition 3). L'influence du vieillissement artificiel sur les variations de dureté Persoz est consignée dans la Figure 7.

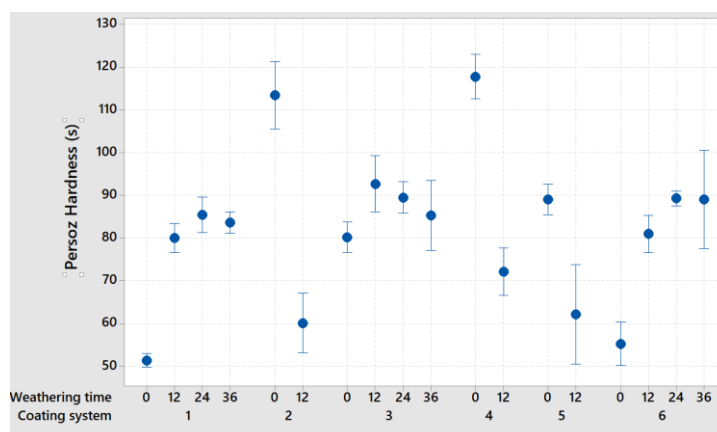


Figure 7 : Influence du temps de vieillissement artificiel (en semaines) sur la dureté Persoz des systèmes de finitions (moyenne et intervalle de confiance à 95%)

Par une précédente étude (Etude MOVAP), sur deux finitions commerciales l'une en phase aqueuse, l'autre en phase solvant, FCBA a montré qu'au fur et à mesure que l'exposition au vieillissement entraînait une augmentation de la dureté avec des valeurs proches de 100 secondes, des microfissures se développaient à la surface de la finition. Ces microfissures étaient invisibles à l'œil nu mais ont pu être révélées par un changement significatif de la brillance (Podgorski 2019). Des craquelages visibles se sont ensuite développés et ont conduit à une diminution de la dureté Persoz, car les fissures ont probablement induit des forces de frottement sur le pendule, qui a donc ralenti.

La Figure 7 montre une diminution considérable de la dureté après 12 semaines de vieillissement pour les systèmes 2, 4 et 5, ce qui est cohérent avec le développement important du craquelage qui a ralenti le pendule. Les mesures

de dureté à des étapes intermédiaires entre 0 et 12 semaines pourraient fournir des informations sur l'ampleur des variations de dureté : la dureté a probablement augmenté au-delà des valeurs initiales déjà élevées, ce qui a favorisé davantage le craquelage des finitions. Après 36 semaines de vieillissement artificiel (EN 927-6), les systèmes de finition 1 et 6 ne présentaient toujours pas de craquelage visible. Le craquelage du système 3 est passé de 0,5 (à 12 semaines) à 1 (à 24 semaines) et à 1,5 après 36 semaines de vieillissement artificiel, ce qui est cohérent avec la diminution apparente de la dureté. Comme pour les systèmes 2, 4 et 5, une augmentation plus importante de la dureté entre 0 et 12 semaines ne peut être exclue. La variation de la dureté du système 6 au cours des 12 premières semaines d'exposition aux intempéries est connue grâce à une autre étude, comme le montre la Figure 8. La principale augmentation s'est produite au cours des premières heures d'exposition aux intempéries. On peut s'attendre à ce que le système de finition 1 présente des variations similaires au cours des 12 premières semaines d'exposition aux intempéries.

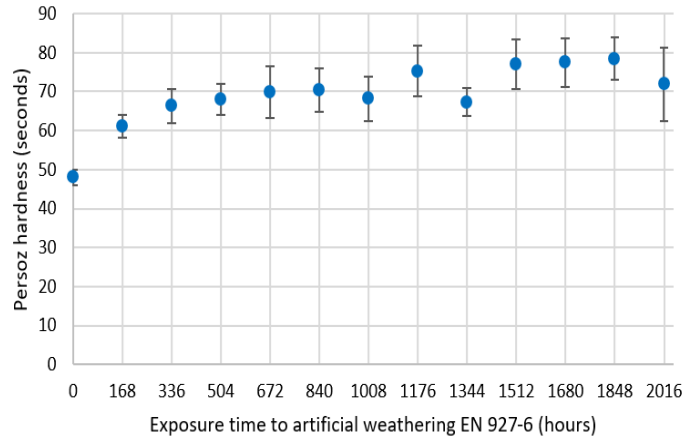


Figure 8 : Variation de la dureté Persoz du système 6 durant les 12 semaines de vieillissement artificiel (Podgorski 2019)

Nous pouvons conclure que le risque de craquelage est très élevé pour les systèmes de finition présentant une dureté Persoz initiale élevée (tels que les systèmes 2, 4 et 5) car l'exposition au vieillissement conduit vraisemblablement à des valeurs supérieures à 100 secondes, valeurs qui sont propices au développement de craquelage. Une augmentation significative de la dureté reflète un changement significatif des propriétés mécaniques. En effet, une corrélation a été trouvée entre les variations de dureté et les variations du module de traction (Malassenet *et al.* 2015) pour une gamme de revêtements acryliques. Il est donc évident de considérer les essais de traction comme un outil permettant d'anticiper et de comprendre le risque de craquelage.

## 4.2 Epaisseur des films réalisés pour les essais de traction

La Figure 9 montre les valeurs individuelles et moyennes des différents films utilisés pour les essais de traction. L'épaisseur moyenne des films secs testés était de 131 µm. L'épaisseur des différents revêtements se situait dans une fourchette relativement étroite, de sorte que l'influence de l'épaisseur sur les résultats de la traction a pu être négligée.

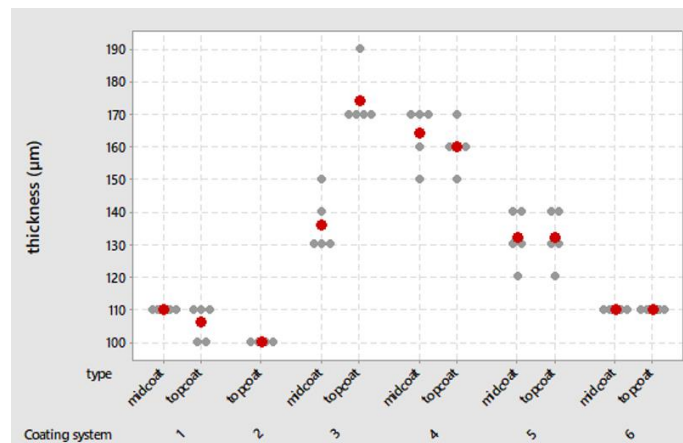


Figure 9 : Valeurs individuelles et moyenne (en rouge) de l'épaisseur des films utilisés pour les essais de traction

## 4.3 Résultats de traction à température ambiante sur films non vieillis

La déformation moyenne à la rupture pour les différents revêtements était très différente (Figure 10). Les systèmes 2, 3 et 4 présentaient les topcoats avec la déformation à la rupture le plus élevé (227 %, 239 % et 216 % respectivement) mais présentaient des craquelages après exposition aux intempéries (Figure 5). Le système 1, qui ne présentait pas de craquelages visibles, avait une déformation à la rupture relativement faible pour son topcoat (85 %) et une déformation à la rupture élevée pour sa couche intermédiaire (209 %). Le système 6, qui ne présentait pas plus de craquelage, avait une déformation à la rupture élevée (175 %). Le système de finition ayant la déformation à la rupture la plus faible (65 %) était le système 5, qui présentait des craquelages significatifs pendant l'essai de vieillissement.

Nous pouvons conclure qu'une déformation à la rupture élevée n'est pas une condition suffisante pour une bonne résistance au craquelage.

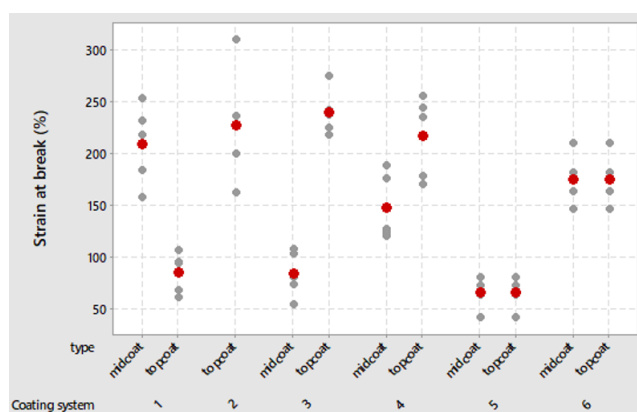


Figure 10 : Valeurs individuelles et Moyenne (en rouge) de la déformation à la rupture pour les 6 systèmes de finition

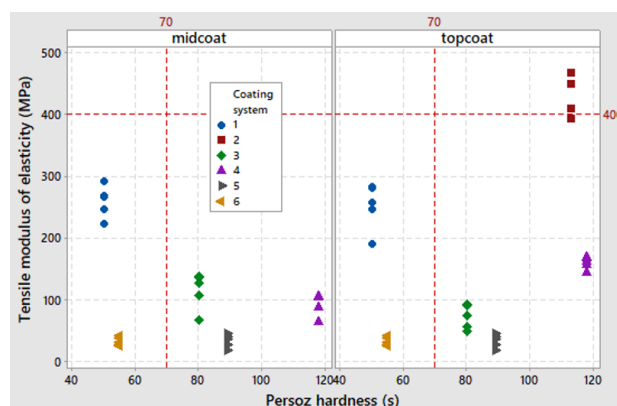


Figure 11 : Module élastique versus la dureté Persoz des 6 systèmes de finition

Dans la Figure 11, le module d'élasticité à la traction a été reporté en fonction de la dureté Persoz. Cette figure montre que les modules d'élasticité les plus faibles ont été enregistrés pour les systèmes 5 et 6 (33 et 32 MPa respectivement). Étant donné que le système 5 a présenté un craquelage élevé (craquelage 3 après 12 semaines de vieillissement artificiel selon EN 927-6, et craquelage 4,3 après 12 mois vieillissement naturel selon EN 927-3) par rapport au système 6 (sans craquelage), nous pouvons conclure qu'un module élastique de traction faible n'est pas une condition suffisante pour une bonne résistance au craquelage. Le module d'élasticité de traction le plus élevé était celui du topcoat du système 2 (429 MPa). Le système 1 (sans craquelage) avait des modules de traction très similaires pour sa couche intermédiaire (259 MPa) et sa couche de finition (251 MPa). Dans le cadre du projet européen SERVOWOOD, il a été montré que les revêtements les plus performants de ce projet avaient un module élastique moyen à température ambiante inférieur à 400 MPa (Podgorski *et al.* 2017). Si nous utilisons cette valeur limite ainsi que la valeur limite pour la dureté Persoz initiale (70 secondes), deux systèmes de revêtement remplissaient les deux conditions (Figure 11) : les systèmes 1 et 6, qui étaient les seuls systèmes exempts de craquelage visibles après 36 semaines (6 048 h) de vieillissement artificiel et 12 mois de vieillissement naturel (45°S).

## 4.4 Résultats de traction sur films non vieillis: Influence de la température

Les résultats de traction obtenus pour chaque système de finition (topcoat et midcoat) et chaque température d'essai (-10°C, 20°C, 45°C, 70°C) sont consignés en annexe (§7).

La forme des courbes *Résistance en traction versus Déformation* renseigne sur le caractère ductile ou fragile des revêtements, résumé dans le Tableau 2.

Système	Couche	-10°C	20°C	45°C	70°C
1	Midcoat	ductile	ductile	ductile	
	Topcoat	ductile	ductile	ductile	ductile
2	Topcoat	ductile	ductile	ductile	ductile
3	Midcoat	fragile	ductile	ductile	
	Topcoat	ductile	ductile	ductile	
4	Midcoat	ductile	ductile	ductile	
	Topcoat	ductile	ductile	ductile	
5	Midcoat et Topcoat	ductile	ductile	ductile	
6	Midcoat et Topcoat	fragile	ductile	ductile	ductile

Tableau 2 : Ductilité ou fragilité des revêtements testés

On remarque que deux revêtements sont fragiles à -10°C : le midcoat du système 3, et le midcoat-topcoat du système 6. Cette particularité expose ces deux revêtements à du craquelage lors d'exposition à basse température. Tous les autres revêtements sont ductiles sur la plage de température variant de -10°C à 45°C (voire 70°C).

La Figure 12 consigne la résistance en traction de l'ensemble des revêtements testés aux 4 températures d'essai en fonction du module élastique. Pour les températures d'essai de traction supérieures ou égales à la température ambiante, les résultats sont relativement groupés : les résistances en traction sont inférieures à 9 MPa et les modules élastiques inférieurs à 500 MPa. Sollicités à -10°C, les revêtements montrent une très forte augmentation de la résistance en traction (valeur moyenne de 19,1 MPa contre 4,0 MPa à 20°C) et du module élastique (valeur moyenne 1545 MPa contre 131 MPa à 20°C) témoignant d'une rigidification des revêtements.

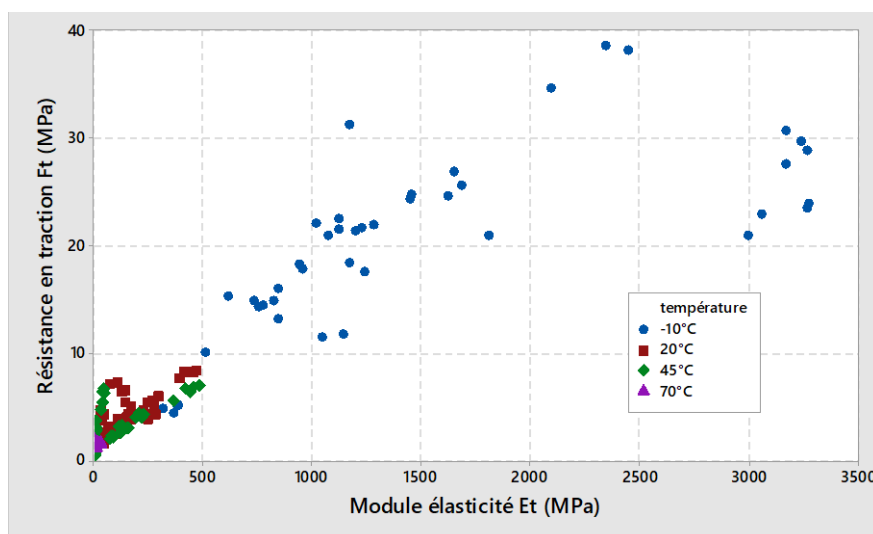


Figure 12 : Résistance en traction en fonction du module d'élasticité pour l'ensemble des revêtements testés et pour les 4 températures d'essai

La Figure 13 présente la résistance en traction en fonction de la déformation à la rupture pour l'ensemble des revêtements aux 4 températures d'essai. A -10°C, les déformations à la rupture sont faibles (en moyenne de l'ordre de 12%) avec des variations importantes de la résistance en traction, comme évoqué ci-dessus. Pour les températures supérieures ou égales à 20°C, les déformations à la rupture sont importantes (de l'ordre de 150% en moyenne) avec, comme mentionné ci-dessus, des variations de résistance en traction restreintes.

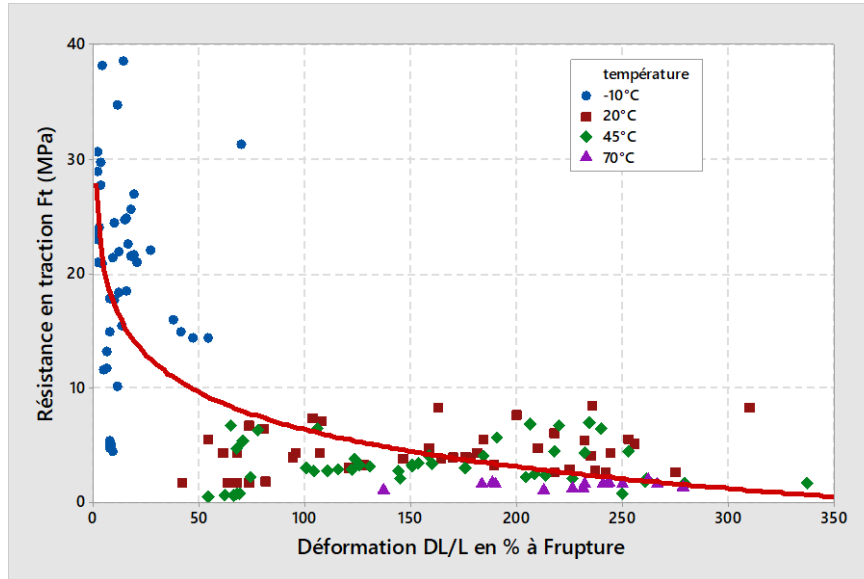


Figure 13: Résistance en traction en fonction de la déformation à la rupture pour l'ensemble des revêtements testés et pour les 4 températures d'essai

La Figure 14 montre la variation de la résistance moyenne en traction des revêtements en fonction de la température d'essai pour chacun des midcoats et topcoats. A -10°C, les systèmes 1 et 3 présentent des résistances en traction de leur midcoat bien supérieures à celle de leur topcoat.

Le système 5 a un comportement très différent des autres systèmes puisqu'il présente la plus faible résistance à la traction, et ce quelle que soit la température d'essai, ce qui favorise très certainement le développement de craquelage observé lors de l'exposition aux intempéries.

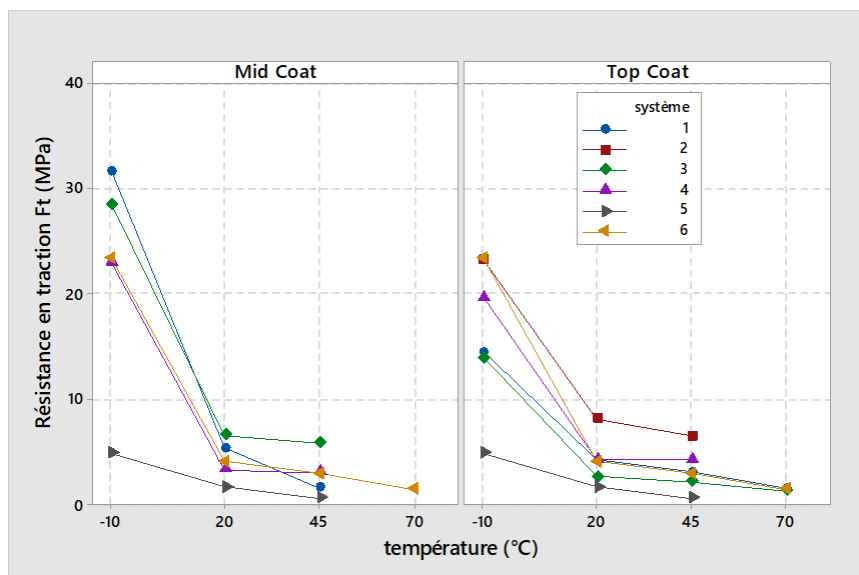


Figure 14 : Variation de la résistance moyenne en traction des revêtements (midcoat à gauche, topcoat à droite) en fonction de la température

La Figure 15 montre la variation du module élastique moyen des revêtements en fonction de la température d'essai pour chacun des midcoats et topcoats. Le système 6 et le midcoat 3, comparés aux autres revêtements, se distinguent par une très forte hausse du module élastique à -10°C (2 898 MPa et 3 273 MPa respectivement).

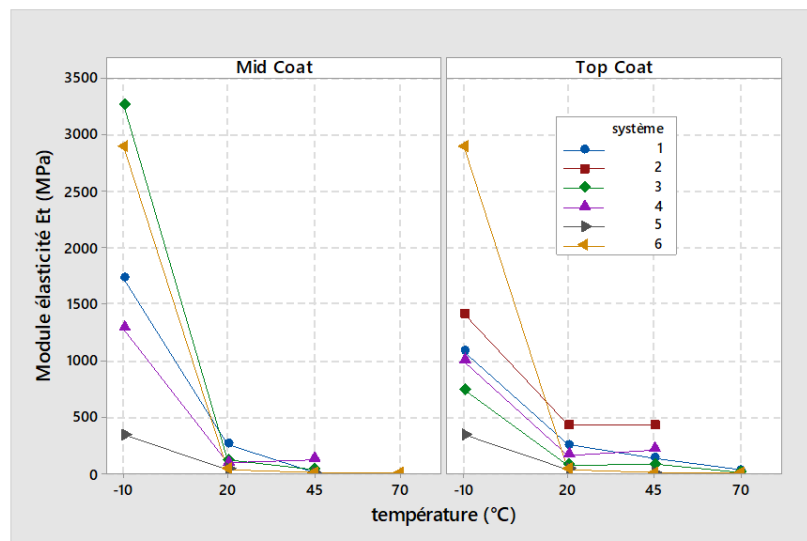


Figure 15 : Variation du module élastique moyen des revêtements (midcoat à gauche, topcoat à droite) en fonction de la température

Comme le rappelle la Figure 16, de façon générale le module élastique des polymères chute brutalement dans la région de la température de transition vitreuse ( $T_g$ ). En-dessous de  $T_g$ , le polymère, dans un état vitreux, est rigide. Son module élastique est de l'ordre du Giga Pascal. Au-dessus de  $T_g$ , le polymère, dans un état caoutchoutique, est souple. Son module élastique est de l'ordre du Méga Pascal.

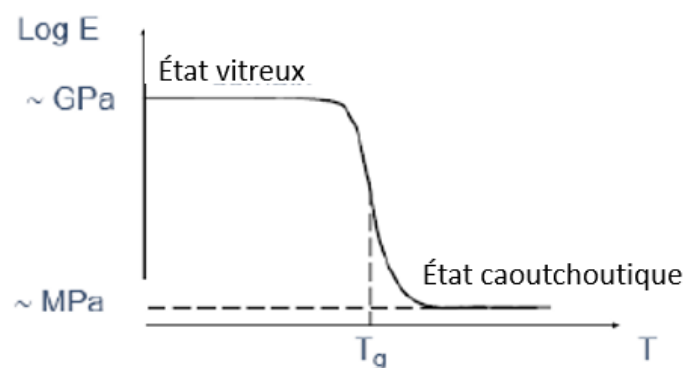


Figure 16 : Variation du module élastique des polymères en fonction de la température

La forme des courbes de la Figure 15 permet donc une approximation grossière de la température de transition vitreuse des revêtements testés. Les midcoats des s st mes 3 et 6 montrent les pentes les plus abruptes des variations de leur module entre  $-10^\circ\text{C}$  et  $20^\circ\text{C}$  avec les modules à  $-10^\circ\text{C}$  les plus élevés (de l'ordre de 3 GPa). Pour ces deux finitions, la  $T_g$  semble donc se situer entre  $-10^\circ\text{C}$  et  $20^\circ\text{C}$ . Pour les midcoats 1 et 4, la  $T_g$  semble inférieure à  $-10^\circ\text{C}$ . Le s st me 5 se distingue car il présente les plus faibles variations de module, ce qui indique que sa  $T_g$  est inférieure à  $-10^\circ\text{C}$ . De ce fait, sur toute cette plage de température ( $-10^\circ\text{C}$  à  $45^\circ\text{C}$ ), il est a priori dans un état souple. Pour autant cela n'a pas suffi à lui conférer une résistance au craquelage : les Figure 1   Figure 3 montrent effectivement que c'est le s st me qui a généré le plus de craquelage.

Pour les topcoats, les variations sont plus limitées, à l'exception du s st me 6 (dont le topcoat est identique au midcoat).  tant donné le très fort module élastique du s st me 6 à  $-10^\circ\text{C}$ , on peut s'étonner que ce s st me n'ait pas généré de craquelage durant les essais de vieillissement naturel. La raison est certainement que durant ces essais de vieillissement, le s st me n'a pas été sollicité à des températures extérieures de  $-10^\circ\text{C}$ , que ce soit à Brest, Bordeaux, Champs sur Marne ou Toulon. On peut cependant penser qu'il aurait généré du craquelage dans un climat de montagne (climat cumulant un nombre important de jours au cours desquels la température minimale est inférieure à  $-5^\circ\text{C}$  selon la définition de Joly *et al.*, 2010).

La Figure 17 montre la variation de la déformation moyenne à la rupture des revêtements en fonction de la température d'essai pour chacun des midcoats et topcoats.

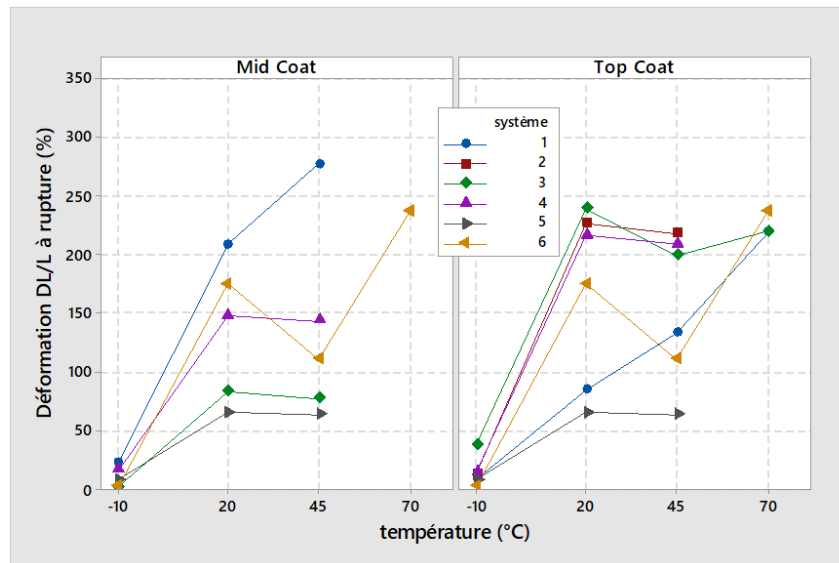


Figure 17 : Variation de la déformation moyenne à la rupture des revêtements (midcoat à gauche, topcoat à droite) en fonction de la température

A -10°C la déformation moyenne à la rupture de l'ensemble des midcoats est faible et l'ordre de 10 % (voir aussi *Tableau 3*, §7.11). La déformation moyenne la plus faible est pour le système 3 (1,5 %), tandis que la déformation moyenne la plus élevée est de 22,1 % pour le midcoat du système 1. Les midcoats se classent de la manière suivante (du moins déformable au plus déformable à -10°C) :

Midcoat 3 < 6 < 5 < 4 < 1

A -10°C, pour les topcoats, la déformation moyenne à la rupture est de 13,8 %. La déformation moyenne la plus faible est de 2,2 % pour le topcoat du système 6 et la plus élevée est de 37,8 % pour le topcoat du système 3. Les topcoats se classent de la manière suivante (du moins déformable au plus déformable à -10°C) :

Topcoat 6 < 4 < 5 ~ 1 < 2 < 3

A 20°C, pour les midcoats, la déformation moyenne à la rupture est de 136 %. C'est le midcoat 5 qui présente la plus faible déformation moyenne à la rupture (65 %), tandis que le midcoat du système 1 présente la plus forte (209 %), suivi par le midcoat du système 6 (175 %). Les midcoats se classent de la manière suivante (du moins déformable au plus déformable à 20°C) :

Midcoat 5 < 3 < 4 < 6 < 1

A 20°C, pour les topcoats, la déformation moyenne à la rupture est de 166 %. C'est le topcoat 5 qui présente la plus faible déformation moyenne à la rupture (65 %), tandis que le topcoat du système 3 présente la plus forte (239 %). Les topcoats se classent de la manière suivante (du moins déformable au plus déformable à 20°C) :

Topcoat 5 < 1 < 6 < 4 < 2 < 3

A 45°C, pour les midcoats, la déformation moyenne à la rupture est de 134 %. C'est le midcoat 5 qui présente la plus faible déformation moyenne à la rupture (64 %), tandis que le midcoat 1 présente la plus forte (277 %). Les midcoats se classent de la manière suivante (du moins déformable au plus déformable à 45°C) :

Midcoat 5 < 3 < 6 < 4 < 1

A 45°C pour les topcoats, la déformation moyenne à la rupture est de 156 %. C'est le topcoat 5 qui présente la plus faible déformation moyenne à la rupture (64 %), tandis que le topcoat 2 présente la plus forte (218 %). Les topcoats se classent de la manière suivante (du moins déformable au plus déformable à 45°C) :

Topcoat 5 < 6 < 1 < 3 < 4 < 2

A 70°C, les données sont peu nombreuses. Seuls trois topcoats ont subi des tests de traction à cette température. Pour deux d'entre eux (topcoat 1 et topcoat 6), l'augmentation de température à 70°C génère une augmentation de la déformation à la rupture. Pour le topcoat 2, l'augmentation de la température semble sans effet sur la déformation à la rupture.

Les résultats montrent que les produits les plus déformables ne sont pas ceux qui résistent le mieux au vieillissement. Pour les topcoats par exemple, le plus déformable, quelle que soit la température, est le topcoat du système 3 qui a généré du craquelage. Il est à remarquer cependant que son midcoat est parmi les midcoats les moins déformables. Le système 1 a donné globalement de très bons résultats de vieillissement. Son midcoat est



le plus déformable quelle que soit la température. Cependant, son topcoat est peu déformable à -10°C et à 20°C. Cela soulève une interrogation : dans un système de finition, faut-il privilégier un revêtement le plus déformable au plus près du bois (midcoat) ou en couche externe (topcoat) ? Les propriétés mécaniques du topcoat pilotent-elles les propriétés mécaniques de l'ensemble du système ? Ces questions restent en suspens et nécessitent des compléments d'étude.

Les résultats de l'étude MECAFINIT remettent en cause une première spécification de performance allemande, évoquée au sein du Comité Européen de Normalisation CEN/TC 139/WG2 (Finitions extérieures pour bois). En effet, les délégués allemands nous ont rapporté qu'en Allemagne, il y a plusieurs années, les finitions utilisées en menuiserie devaient avoir une déformation à la rupture d'au moins 20%. Cette exigence a depuis été supprimée car personne n'était plus capable d'en connaître l'origine et de définir quelles étaient les conditions d'essai associées et notamment la vitesse de l'essai de traction (connue pour influencer sur le résultat). Si une forte déformation à la rupture n'est pas un gage de performance, une trop faible déformation génère du craquelage. C'est ce que montre notamment les résultats du système 5. Sa déformation à 20°C et 45°C est la plus faible (65%) et ce système a très vite généré du craquelage.

En Italie, une certification de produits de finitions extérieures pour bois stipulait que la déformation à la rupture devait être supérieure à 50%. Les performances du système 5 dans l'étude MECAFINIT montrent que cette déformation n'est pas suffisante pour résister au craquelage. Cette certification précisait aussi qu'après un vieillissement de 2 semaines selon EN 927-6 (test de vieillissement artificiel) la déformation à la rupture ne devait pas être réduite de plus de 20% de sa valeur initiale.

## 4.5 Résultats de traction à température ambiante sur films vieillis

Les Figure 18 et Figure 20 montrent la résistance à la traction du système 6 et du système 5 avant vieillissement des films (essai de traction à température ambiante). La forme des courbes contrainte-déformation permet de conclure que ces deux revêtements étaient ductiles et que leur température de transition vitreuse (Tg) était inférieure à la température ambiante.

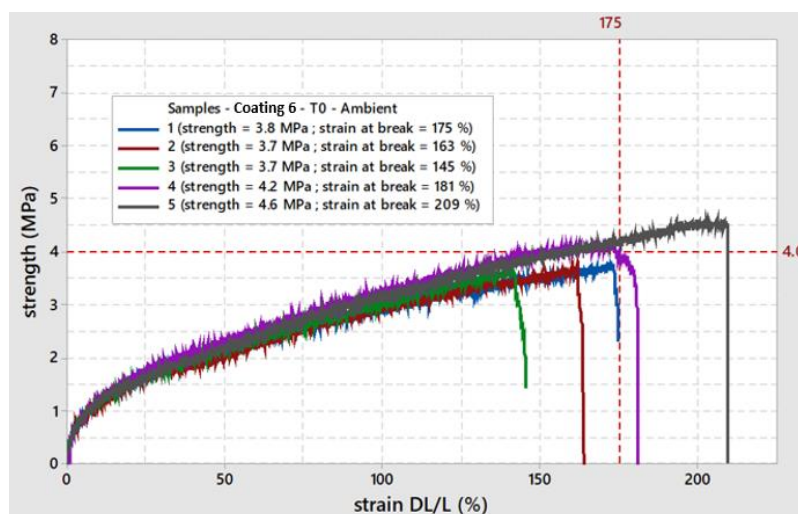


Figure 18 : résistance à la traction du système 6 non vieilli (valeurs moyennes en rouge)



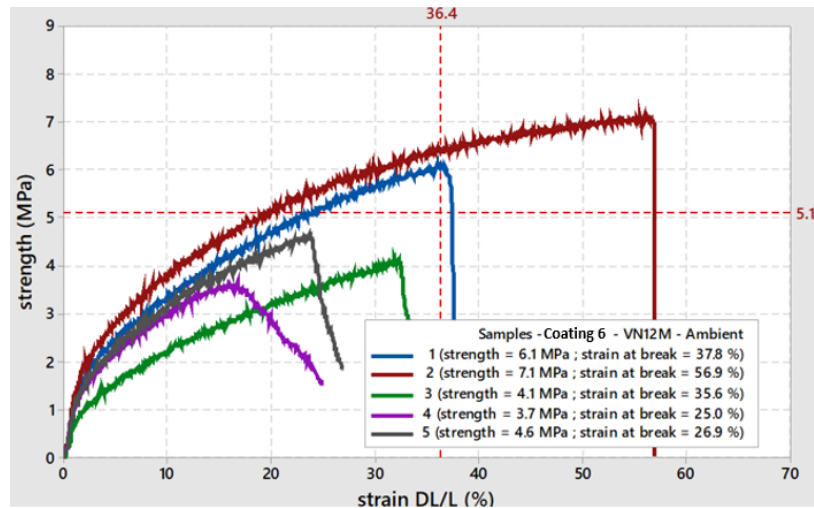


Figure 19 : Résistance à la traction du système 6 après 12 mois de vieillissement naturel (valeurs moyennes en rouge)

Les Figure 19 et Figure 21 montrent la résistance à la traction du revêtement 6 et du revêtement 5 après 12 mois d'exposition aux intempéries (site FCBA, Bordeaux). L'exposition des films à 1 an de vieillissement naturel a entraîné une chute spectaculaire de la déformation à la rupture qui a été divisée par 5 (déformation à la rupture de 36,4 %) pour le système 6, et par 23 pour le système 5 (déformation à la rupture de 2,8 %). Les formes des courbes indiquent que le système de finition 6 était encore ductile après vieillissement, alors que le système 5 est devenu fragile et cassant. Il a été démontré que la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) des finitions extérieures pour bois augmentait au cours du vieillissement (Schmid 1992, Podgorski *et al.* 1996). Malgré cette augmentation attendue, nous pouvons affirmer que le système 6 était encore utilisé au-dessus ou proche de sa  $T_g$  (état vitreux).

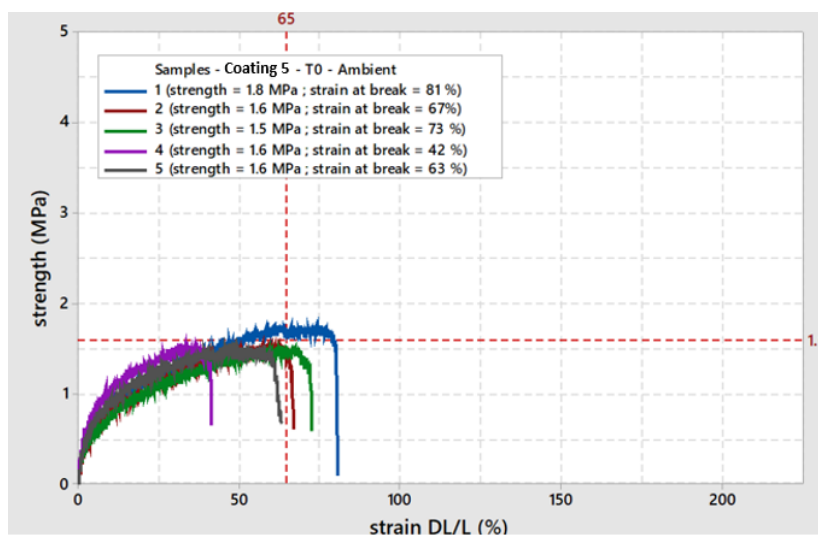


Figure 20: Résistance à la traction du système 5 non vieilli (valeurs moyennes en rouge)

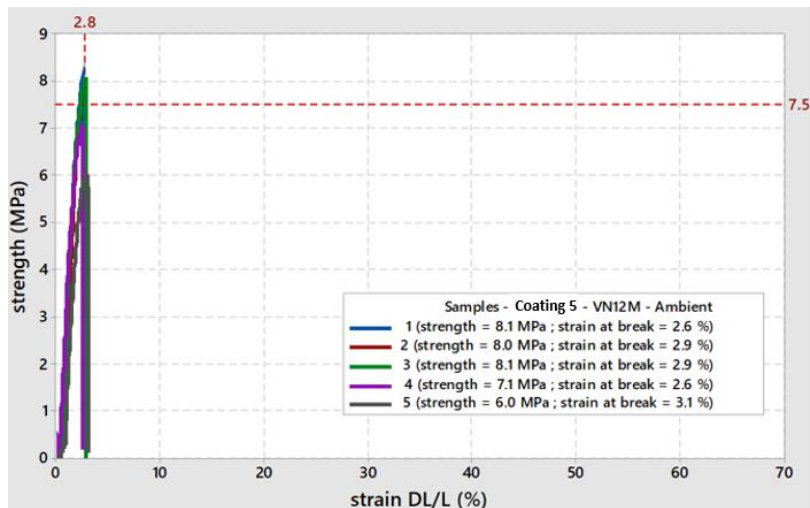


Figure 21 : Résistance à la traction du système 5 après 12 mois de vieillissement naturel (valeurs moyenne en rouge)

L'exposition au vieillissement a conduit à une augmentation du module d'élasticité, comme le montre la Figure 22 pour les systèmes 5 et 6. Le premier mois d'exposition au vieillissement naturel a multiplié par 10 le module d'élasticité du système 5 et par 3 celui du système 6. Cela peut être dû à la lixiviation d'ingrédients sensibles à l'eau et/ou à une réticulation supplémentaire (De Meijer 2002). Pour les films vieillis 9 mois à 45° face au sud, le module élastique du système 6 a été multiplié par 11. Le système 5 a vu son module élastique multiplié par 20 à la fin du vieillissement. Malgré ces variations, le module d'élasticité du système 6 était beaucoup plus faible que celui du système 5 dont le module était supérieur à 400 MPa après 3 mois d'exposition. L'augmentation du module élastique a confirmé une augmentation de la température de transition vitreuse (Tg) due au vieillissement pour les deux systèmes. Nous concluons que la résistance au craquelage était meilleure lorsque le module d'élasticité restait inférieur à 400 MPa pendant l'exposition aux intempéries.

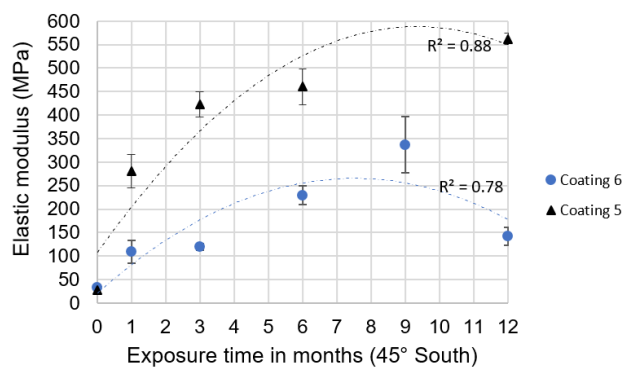


Figure 22 : Influence du vieillissement naturel (en mois) sur le module élastique de traction des systèmes 5 et 6

Comme le montre la Figure 23 pour les deux systèmes 5 et 6, une diminution spectaculaire de la déformation à la rupture s'est produite au cours du premier mois de vieillissement, suivie d'une diminution plus lente au cours des mois suivants.

Pour faciliter la comparaison des 2 systèmes de finition, nous avons défini un ratio de la déformation à la rupture comme suit :

$$\text{Rétention de la déformation initiale à la rupture} = 100 \times \frac{\text{déformation à la rupture après vieillissement}}{\text{déformation à la rupture avant vieillissement}}$$

Après vieillissement, comme le montre la Figure 24, le système 6 a conservé 21 % de sa déformation initiale à la rupture, tandis que le système 5 en a conservé 4 % seulement, contribuant ainsi au développement de craquelage observé pour ce système lorsqu'il est appliqué sur bois et exposé aux intempéries.

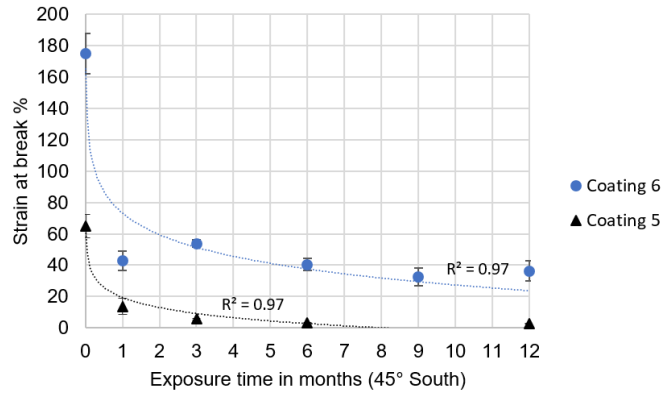


Figure 23: Influence du vieillissement naturel (en mois) sur la déformation à la rupture des systèmes 5 et 6

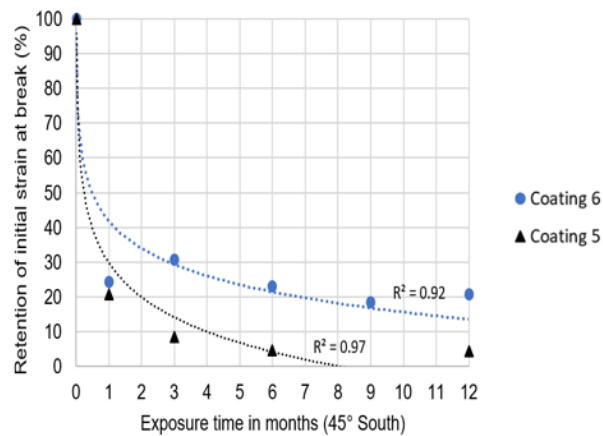


Figure 24 : Influence du vieillissement naturel (en mois) sur la rétention de la déformation initiale à la rupture pour les systèmes 5 et 6

Des tendances similaires ont été observées en exposant les films du système 6 à du vieillissement artificiel (EN 927-6) pendant une durée de 12 semaines (2016 heures). Une diminution spectaculaire de la déformation à la rupture s'est produite au cours de la première semaine de vieillissement artificiel (Figure 25), comme cela a été observé au cours du premier mois d'exposition naturelle (Figure 23). Une diminution plus graduelle s'est ensuite produite au cours des semaines suivantes de vieillissement artificiel. A la fin du vieillissement, le système 6 a conservé 25% de sa déformation initiale à la rupture, ce qui est du même ordre de grandeur que lors du vieillissement naturel (21%).

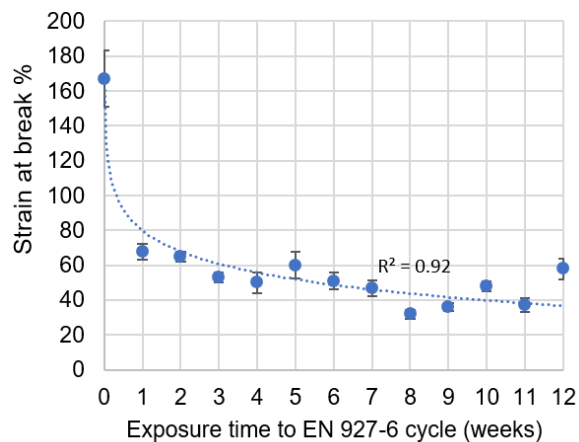


Figure 25 : Influence of du vieillissement artificiel (en semaines) sur l'allongement à la rupture du système 6

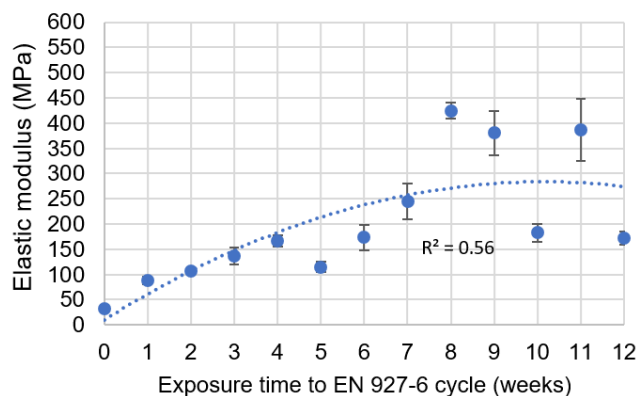


Figure 26 : Influence du vieillissement artificiel (en semaines) sur le module élastique du système 6

## 4.6 Résistance au choc

Les résultats de résistance au choc des 6 systèmes de finitions sont présentés dans la Figure 27 comparativement à des surfaces de chêne et pin sylvestre sans finition (Brut). Les systèmes de finition présentent des résistances au choc très différentes, le système 3 ayant conduit à la plus forte force (29 N), tandis que le système 5 a conduit à la plus faible (4 N).

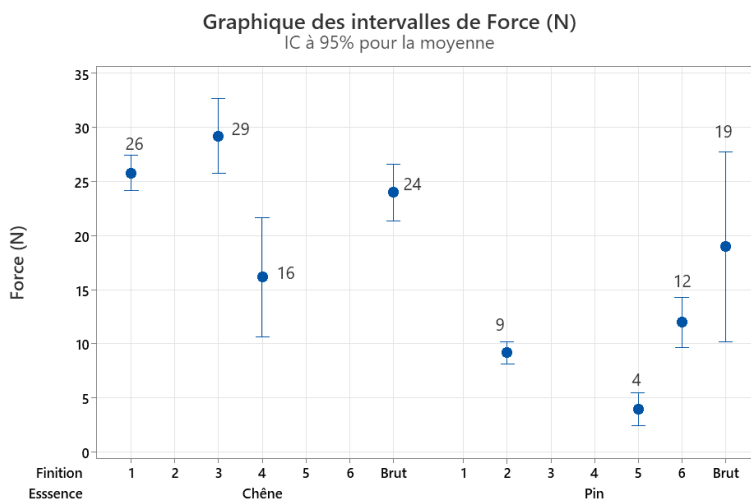


Figure 27 : Résistance au choc des finitions

Dans la Figure 28, la dureté Persoz des systèmes de finition est représentée en fonction de la force maximale pour laquelle aucune fissure apparaît sur le revêtement. Cette figure montre que les deux propriétés, dureté Persoz et résistance à l'impact, ne sont pas corrélées. Par exemple, le système 1 présente une faible dureté et forte résistance à l'impact. A l'inverse le système 2 présente une forte dureté et une faible résistance à l'impact. En d'autres termes, nous pouvons conclure que la faible dureté recherchée (car favorable à la résistance au vieillissement) n'est pas en contradiction avec la résistance aux chocs et qu'elle n'est pas non plus préjudiciable à l'égrenabilité des finitions.

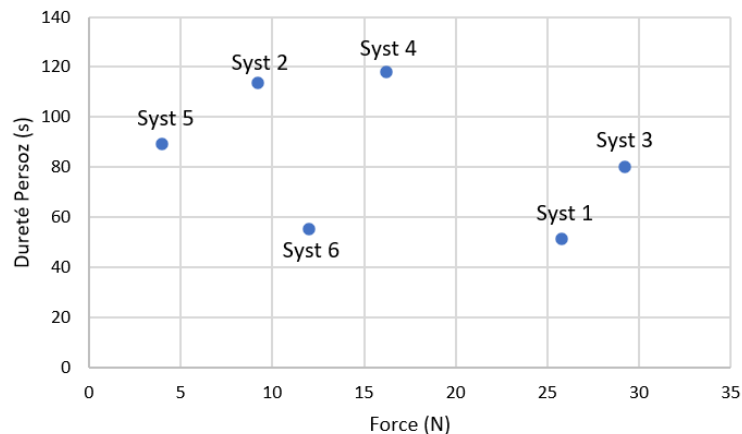


Figure 28 : Dureté Persoz versus Force

## 5 Conclusions

Le projet MECAFINIT avait pour objectif d'étudier les propriétés mécaniques de finitions commerciales utilisées pour protéger les menuiseries en bois afin de mieux comprendre les interactions entre le bois et les produits de finition et notamment les apparitions de craquelage. Les propriétés mécaniques ont été évaluées par des mesures de dureté Persoz sur les bois revêtus de finition. Des tests de traction sur films libres de produits de peinture ont été réalisés afin de déterminer la déformation à la rupture, la résistance en traction, le module d'élasticité. Des mesures de résistance au choc complètent les investigations. Six systèmes commerciaux de finition provenant de 5 fabricants ont été étudiés. Ils sont tous commercialisés pour le secteur de la menuiserie bois. Leur performance au vieillissement est connue grâce à l'étude CODIFAB PREDIFIMEX, menée en parallèle.

### Dureté Persoz

La dureté Persoz des revêtements extérieurs pour le bois est rarement mesurée dans l'industrie. Nos résultats ont montré que le risque de craquelage est très élevé pour les revêtements conçus avec une dureté Persoz initiale élevée, tels que les systèmes 2, 4 et 5. Comme généralement toutes les finitions exposées à l'extérieur présentent une augmentation de la dureté Persoz, des systèmes avec une dureté initiale élevée vont rapidement conduire à des valeurs de dureté supérieures à 100 secondes, qui se sont avérées propices au développement de craquelage. Les systèmes dont la dureté Persoz initiale est supérieure à 70 secondes ont été sujets au développement de craquelage, tandis que les systèmes dont la dureté Persoz est inférieure à 70 secondes ont répondu à la spécification de performance (craquelage < 0,7) de EN 927-2 après 3 ans de vieillissement naturel sur 4 sites d'exposition (Bordeaux, Brest, Champs sur Marne, Toulon) ainsi qu'après 6 048 heures de vieillissement artificiel. Des variations limitées de la dureté (inférieures à 100 secondes) sont une condition pour résister au craquelage. Des mesures de dureté à des moments intermédiaires au cours de l'exposition aux intempéries sont recommandées pour fournir des informations sur l'ampleur des variations de dureté et donc pour ajuster la formulation du revêtement afin de résister au craquelage.

Nous avons montré que la faible dureté Persoz que l'on préconise pour les finitions extérieures pour bois n'est pas préjudiciable à la résistance aux chocs. Elle n'est pas non plus préjudiciable à l'égrenabilité des finitions.

### Propriétés en traction

La pertinence du craquelage comme critère de performance dans EN 927-2 peut être questionnée : ce contrôle visuel effectué après 1 an de vieillissement naturel indique clairement que le revêtement n'était pas assez souple pour résister aux intempéries et aux variations dimensionnelles du bois. Cependant, il ne fournit aucune explication sur les causes de la rupture du film de finition. Par conséquent, il est peu utile aux fabricants de peinture pour concevoir des revêtements qui résistent au craquelage. Les essais de traction sur films libres se révèlent être un outil précieux pour mieux comprendre le risque craquelage et donc permettre une sélection de systèmes adaptés à la menuiserie bois dans toute la gamme de températures à laquelle elle est exposée. Dans cette étude, des essais de traction ont été menés sur les différentes couches de finition constituant les 6 systèmes commerciaux étudiés. Ces essais ont été réalisés sur des films libres de produits à différentes températures d'essai (-10°C, 20°C, 45°C). Quelques essais supplémentaires ont été réalisés à 70°C. Les essais ont permis de déterminer la résistance en traction, la déformation à la rupture, le module élastique en traction.

La forme des courbes résistance à la traction versus déformation a permis de savoir si les revêtements étaient ductiles ou au contraire fragiles. A des températures supérieures ou égale à 20°C, tous les revêtements étaient ductiles, donc a priori capables de résister à la fissuration. A -10°C, deux revêtements se sont révélés fragiles, ce qui les prédispose au craquelage lorsqu'exposés dans des climats froids. L'un de ces revêtements est le système 6 (midcoat et topcoat identiques) qui s'est pourtant révélé le plus résistant au craquelage de l'étude. Sa fragilité à -10°C ne semble pas l'avoir pénalisé parce que les climats dans lesquels les systèmes de finition ont été exposés (Brest, Champs Sur Marne, Toulon, Bordeaux) ont présenté très peu voire pas de températures aussi négatives durant les 3 ans d'exposition. Réaliser des essais de traction à 0°C ou -5°C permettrait d'affiner le profil des revêtements.

- **Déformation à la rupture**

La déformation à la rupture mesurée à température ambiante est généralement un paramètre sur lequel le formulateur s'appuie, en favorisant les résines permettant une forte déformation à la rupture. Notre étude révèle qu'une sélection de finitions sur la base des valeurs de déformation à la rupture peut conduire à une mauvaise sélection de liants. En effet, nos résultats montrent qu'une déformation à la rupture élevée (avant toute épreuve de vieillissement) n'est pas une condition suffisante pour une bonne résistance au craquelage. Des revêtements ont présenté la même déformation à la rupture mais avaient des modules d'élasticité à la traction différents. C'est par exemple le cas du topcoat 2 et du topcoat 3 : avec des déformations à la rupture voisines (de l'ordre de 230 %) l'un a présenté beaucoup de craquelage car son module élastique était élevé.

La déformation à la rupture élevée (avant vieillissement) n'est pas un critère de performance d'autant que nous avons montré que cette déformation diminue dramatiquement dès les premières heures d'exposition au vieillissement. Les essais de vieillissement de films pour quelques finitions ont montré, qu'après un mois d'exposition au vieillissement naturel, le meilleur système de revêtement peut perdre jusqu'à 80 % de sa déformation à la rupture initiale.

Pour sélectionner un revêtement performant, il est important de penser non pas en termes de déformation à la rupture, mais en termes de rétention de la déformation à la rupture après le vieillissement. Sur la base des quelques films exposés au vieillissement puis soumis aux essais de traction, nous avons montré que les revêtements résistaient à la fissuration lorsque leur rétention à la rupture après vieillissement était supérieure à 20 %. Nous avons montré que les essais de traction sur des films libres exposés aux intempéries pendant une courte durée donnent une bonne indication de la performance à long terme du revêtement. Ces essais sont donc très utiles car ils permettent de mesurer et d'expliquer en peu de temps la résistance au craquelage. Dans le schéma normatif actuel, l'évaluation de la résistance au craquelage nécessite une exposition au vieillissement naturel d'une durée de un an mais ne procure aucune explication du phénomène.

- **Module élastique**

Peu exploré, le module d'élasticité est pourtant un élément clé de la formulation. Une précédente étude (projet SERVWOOD) concluait que les performances des finitions étaient meilleures lorsque le module élastique était inférieur à 400 MPa (sur la base du lot de finitions étudiées). L'étude MECAFINIT montre qu'un faible module élastique initial n'est pas une condition suffisante pour une bonne résistance à la fissuration. Il est important de considérer les variations du module élastique du fait de l'exposition au vieillissement. Nos essais de vieillissement couplés à un essai de traction à 20°C montrent que le module élastique augmente dès les premières heures, et confirme que la résistance au craquelage est meilleure lorsque le module d'élasticité en traction reste inférieur à 400 MPa pendant le vieillissement, en plus d'une rétention de la déformation à la rupture d'au moins 20 %. Ces premiers seuils pourront être affinés grâce à l'étude CODIFAB-SIPEV INFIPERF, en cours au moment de la rédaction de ce rapport.

- **Résistance en traction**

La résistance en traction donne, elle aussi, des renseignements intéressants sur les performances des finitions. Clairement une faible résistance en traction (cf système 5) prédispose la finition au craquelage. On privilégiera des systèmes de finition dont la résistance en traction (à 20°C) est supérieure à 2 MPa.

L'étude MECAFINIT permet de conclure que les essais de traction couplés à un vieillissement des films constituent un outil incontournable pour anticiper et comprendre le risque de craquelage, et donc pour formuler des finitions performantes. L'objectif est de sélectionner des finitions présentant le moins de variations de leur déformation à la rupture et de leur module élastique du fait du vieillissement.

Les systèmes de finition 1 et 6 sont les seuls systèmes ayant respecté les spécifications de craquelage (selon EN 927-2). Ces deux systèmes sont ceux présentant les duretés Persoz les plus faibles (inférieures à 70 secondes). Leur déformation à la rupture avant vieillissement est élevée (supérieure à 175 %). Le système 6 voit sa déformation à la rupture dramatiquement diminuer une fois les films vieillis. Il conserve malgré tout 20 % de sa déformation initiale (avant vieillissement), ce qui a priori suffit pour résister au craquelage. Les variations de propriétés de traction du système 1 ne sont pas connues après vieillissement. Ces deux systèmes présentent des résistances en traction supérieures à 2 MPa. Les seuils pressentis par FCBA grâce au projet MECAFINIT pourront être affinés grâce à l'étude INFIPERF (financement CODIFAB-SIPEV).

L'expertise acquise par FCBA via le projet MECAFINIT a permis la rédaction de la norme EN 927-14 *Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Determination of tensile properties of coating films*. Discutée au sein du CEN/TC139/WG2 durant le déroulement du projet, elle est finalement parue au niveau européen en décembre 2022 et reprise en norme française en janvier 2023.

Les résultats de l'étude MECAFINIT remettent en cause une spécification de performance stipulée dans une certification de produits de finitions extérieures italienne. Celle-ci imposait une déformation à la rupture supérieure à 50%. Nous montrons que cela n'est pas suffisant, tout en recommandant de prendre aussi en considération le module élastique. Cette même certification précisait aussi qu'après un vieillissement de 2 semaines selon EN 927-6 (test de vieillissement artificiel) la déformation à la rupture ne devait pas être réduite de plus de 20 % de sa valeur initiale. Cette valeur de 20 % n'est pas pertinente. En effet, le meilleur système de notre étude (système 6) a présenté une perte de près de 80 % de sa déformation à la rupture initiale, tout en assurant malgré tout une résistance au craquelage.

Dans un système de finition, faut-il privilégier un revêtement le plus déformable au plus près du bois (midcoat) ou en couche externe (topcoat) ? Les propriétés mécaniques du topcoat pilotent-elles les propriétés mécaniques de l'ensemble du système ? Ces questions restent en suspens et nécessitent des investigations complémentaires.



## 6 Références

Bulian, B., Magagnoli, C., Tirelli, P. The effects of ageing on mechanical and spectroscopic properties of free films of exterior wood varnishes. PRA's 4th International Woodcoatings Congress, The Hague (NL), 25-27 October 2004.

De Meijer, M. Mechanisms of failure in exterior wood coatings. PRA's 4th International Woodcoatings Congress, The Hague (NL), Paper 40, 18 pages, 2002.

Forsthuber B., Grüll G., Podgorski L., Bulian F. Arnold M., Naden B., Graystone J. The influence of exposure orientation and inclination on the service life of wood coatings. PRA's 12th International Woodcoatings Congress, Amsterdam (NL), 8-9 November 2022.

EN 438-2 (2018) Stratifiés décoratifs haute pression (HPL) - Plaques à base de résines thermodurcissables (communément appelées stratifiés) - Partie 2 : détermination des propriétés

EN 927-3 (2012). Paints and varnishes - Coating materials and coating systems for exterior wood - Part 3: Natural weathering test.

EN 923-6 (2018). Paints and varnishes. Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV lamps and water.

EN 927-14 (2022). Paints and varnishes. Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Determination of tensile properties of coating films.

EN ISO 1522 (2006). Paints and varnishes - Pendulum damping test.

EN ISO 4618 (2014). Paints and varnishes - Terms and definitions

EN ISO 4628-4 (2004). Paints and varnishes. Evaluation of degradation of coatings – Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance. Part 4: Assessment of cracking.

prEN 927-14 (2021) - Paints and varnishes. Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Determination of tensile properties of coating films.

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailles J., Hilal M, Wavresky P., Les types de climats en France, une construction spatiale, Cybergeog: European Journal of Geography, 2010,. DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeog.23155>

Kivilevich, A. A paradigm shift: the new role of heterogeneity and interactions, JCT Coatings Tech, 38-48, 2004.

Mauguière-Guyonnet, F., Burget, D., Fouassier, J.P., Merlin, A. Photocurable formulations for wood coating applications. Proceedings of the FATIPEC Congress, Aix-en-Provence (FR), April 2004.

Grüll, G. Forsthuber, B., Ecker, M. Sensitivity of waterborne coatings materials to high acidity and high content of Arabinogalactan in larch heartwood. PRA's 9th International Woodcoatings Congress, Amsterdam (NL), 14-15 October 2014.

Malassenet, L., George, B., Merlin, A., Podgorski, L. Persoz hardness: a useful property to study performance of exterior wood coatings. International Wood Products Journal, 6:4, 174-180, 2015.

Podgorski, L, Merlin, A, Déglise, X (1996): Analysis of the natural and artificial weathering of a wood coating by measurement of the glass transition temperature. Holzforschung, 50, 282-287.

Podgorski, L., Malassenet, L., Reynaud, C. Variation in coating hardness during the EN 927-6 weathering test: influence of pigmentation. Proceedings of the International Research Group on Wood Protection, Document IRG/WP 16-40739, 10 pages, 47th IRG Annual Meeting, Lisbon (PT), 15-19 May 2016.

Podgorski L., De Meijer M., Lanvin J.-D. Influence of Coating Formulation on Its Mechanical Properties and Cracking Resistance. Coatings, 7(10), 163, 2017.

Podgorski, L. Gloss and hardness variations as early indicators of wood coating failure during weathering tests. Proceedings of the International Research Group on Wood Protection, Document IRG/WP 19-40886, 13 pages, 50th IRG Annual Meeting, Quebec City (CA), 12-16 May 2019.



Podgorski, L., Reynaud, C., Montibus, M. Fungal Growth on Coated Wood Exposed Outdoors: Influence of Coating Pigmentation, Cardinal Direction, and Inclination of Wood Surfaces. *Coatings*, 27, 2019.

Podgorski L. Towards new performance criteria for exterior wood coatings. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Woodcoatings Congress, Paper 4.5, 13 pages, Amsterdam, The Netherlands, 8-9 November, 2022.

Podgorski L. Towards new performance criteria for exterior wood coatings. *European Coatings Journal*, Issue 04, 72-77, 2023.

Schmid, E.V (1992): Glasumwandlungstemperatur und Wasseraufnahme von bewittertem Holzlasuren. *Farbe und Lack*, 320-330.

## 7 Annexe : Résultats de traction à différentes température pour chaque système de finition (sans vieillissement)

### 7.1 Introduction

Cette annexe présente les résultats de traction obtenus individuellement pour chaque système de finition à différentes températures d'essai.

Pour chaque système, un tableau récapitule les températures utilisées pour les essais de traction, le nombre minimal de répliques réalisées, la moyenne et le coefficient de variation de la résistance en traction, du module d'élasticité, de la déformation à la force maximale, de la déformation à la rupture, de l'épaisseur des films.

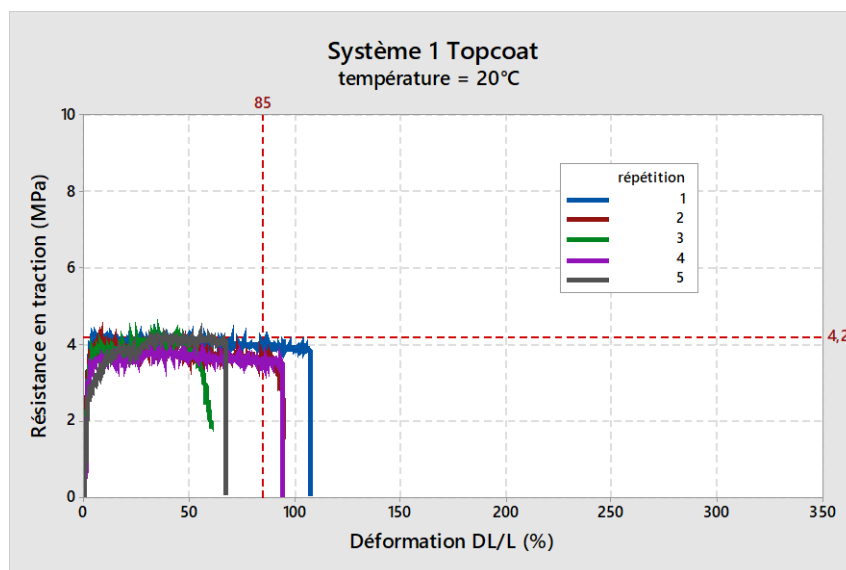
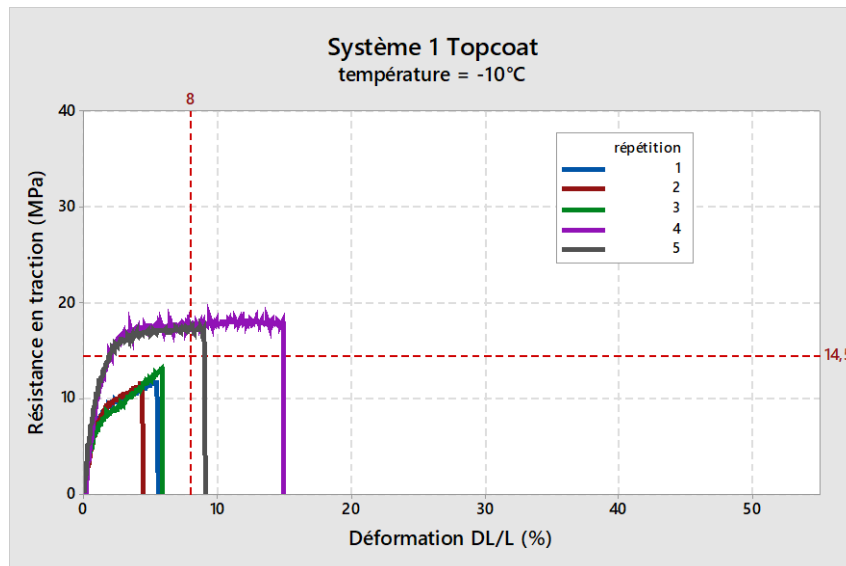
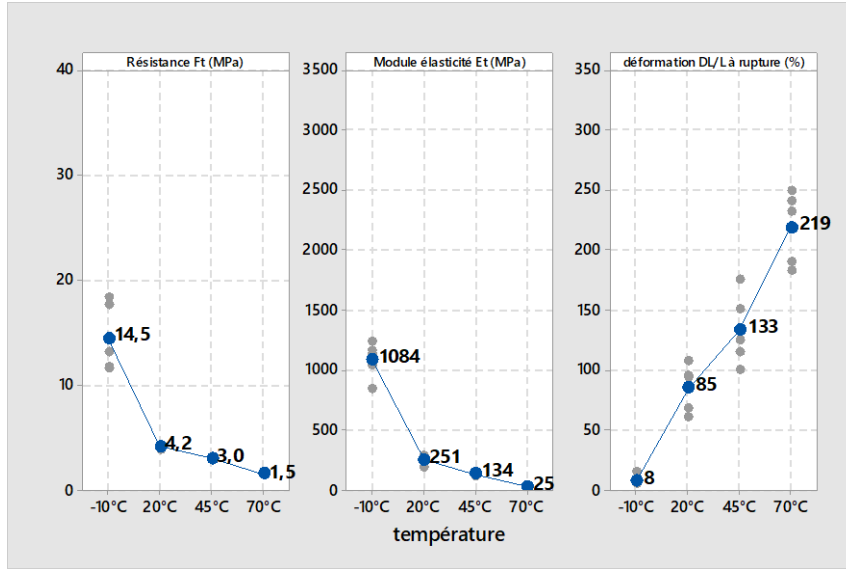
Pour chaque système sont ensuite présentées les courbes de la résistance à la traction, du module d'élasticité, de la déformation à la rupture en fonction de la température d'essai : -10°C, 20°C, 45°C et pour quelques revêtements 70°C.

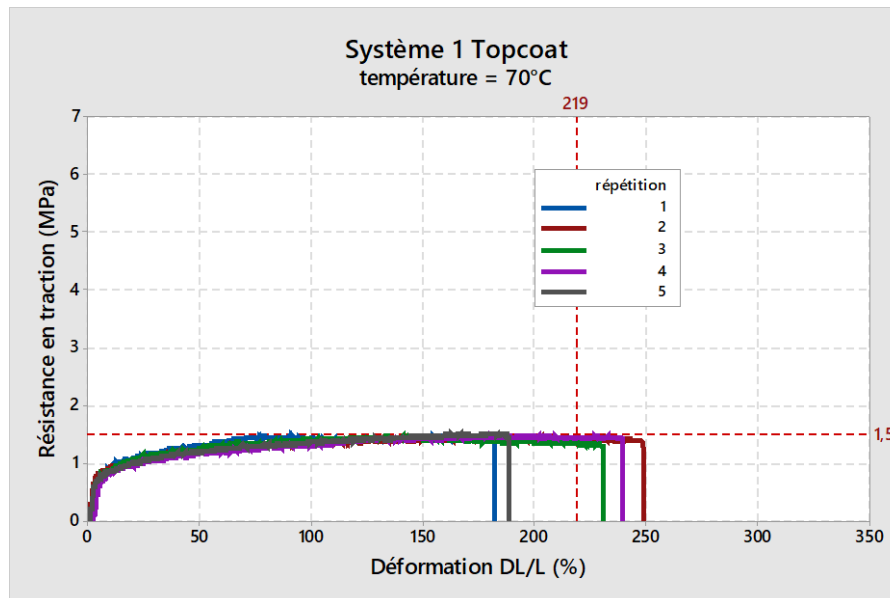
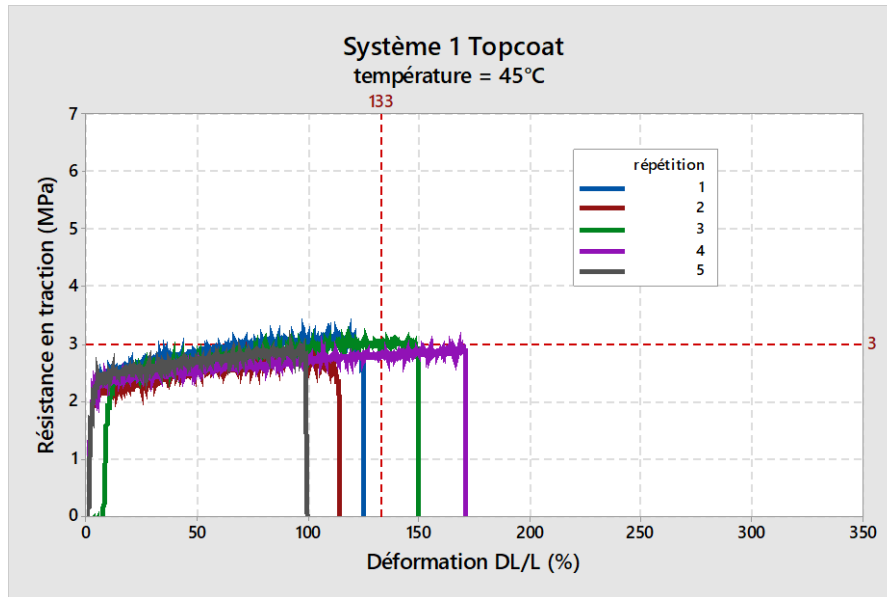
Les courbes résistance en traction versus déformation sont ensuite présentées pour chaque température d'essai et font figurer en rouge la moyenne obtenue pour la résistance en traction et la déformation à la rupture.

Enfin un tableau récapitule les moyenne, minimum et maximum de la résistance à la traction, du module d'élasticité, de la déformation à la rupture à -10°C, 20°C, 45°C pour les midcoats et les topcoats.

### 7.2 Système 1 -Topcoat

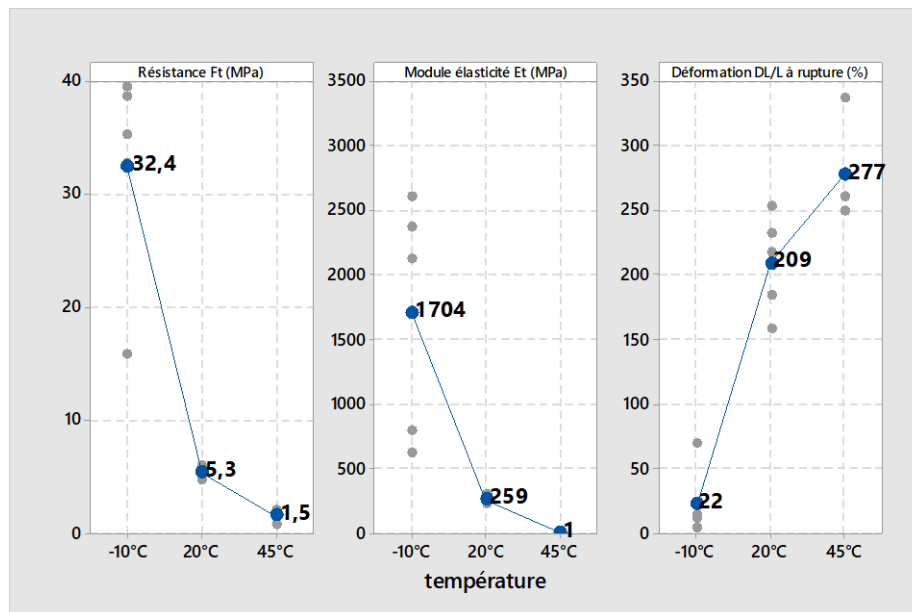
Variable	température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft résistance en traction (MPa)	-10°C	5	14,5	23
	20°C	5	4,2	4
	45°C	5	3,0	5
	70°C	5	1,5	2
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	1084	14
	20°C	5	251	15
	45°C	5	134	12
	70°C	5	25	17
Déformation DL / L à F max (en %)	-10°C	5	8	46
	20°C	5	26	55
	45°C	5	120	26
	70°C	5	159	29
Déformation DL / L à F rupture (en %)	-10°C	5	8	53
	20°C	5	85	23
	45°C	5	133	22
	70°C	5	219	14
Epaisseur film (mm)	-10°C	5	0,120	0
	20°C	5	0,106	5
	45°C	5	0,128	3
	70°C	5	0,130	0

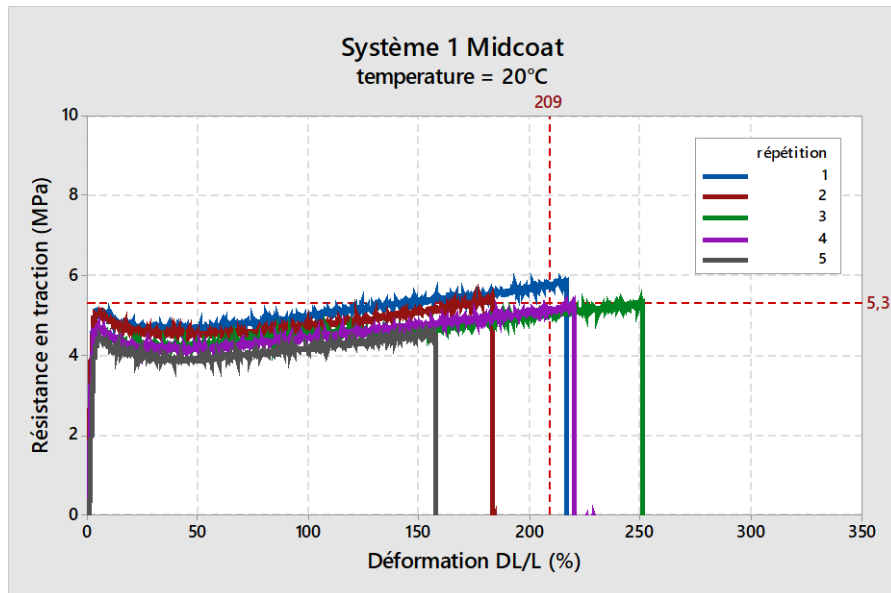
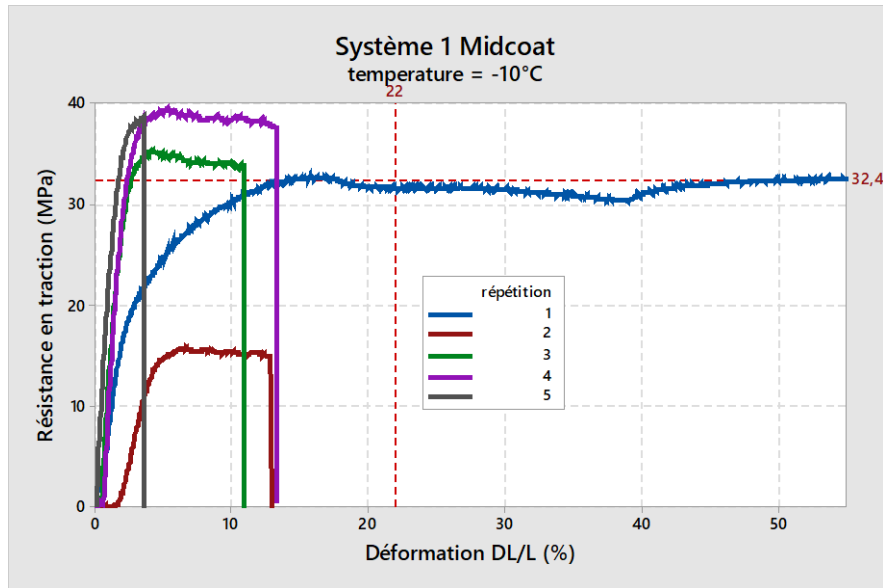


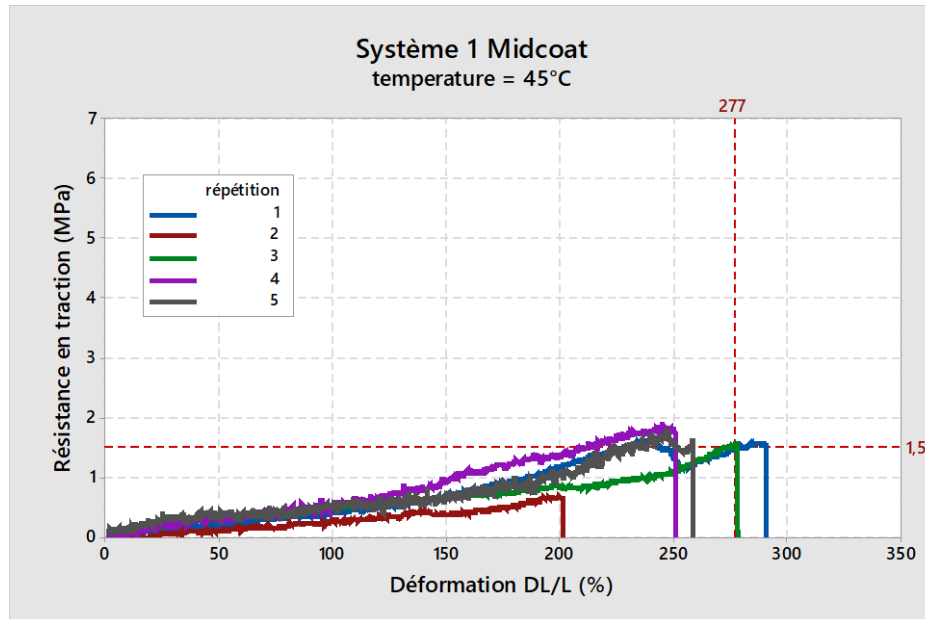


## 7.3 Système 1 - Midcoat

Variable	température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft résistance en traction (MPa)	-10°C	5	32,4	30
	20°C	5	5,3	9
	45°C	5	1,5	32
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	1704	54
	20°C	5	259	10
	45°C	5	1	66
Déformation DL / L à F max (en %)	-10°C	5	7	72
	20°C	5	204	17
	45°C	5	241	12
Déformation DL / L à F rupture (en %)	-10°C	5	22	122
	20°C	5	209	18
	45°C	5	277	13
Epaisseur film b (mm)	-10°C	5	0,092	18
	20°C	5	0,110	0
	45°C	5	0,086	16

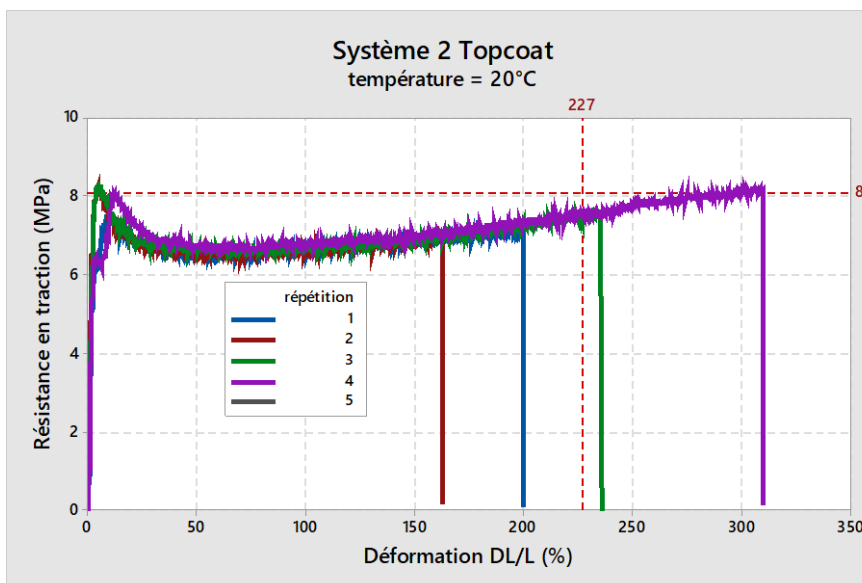
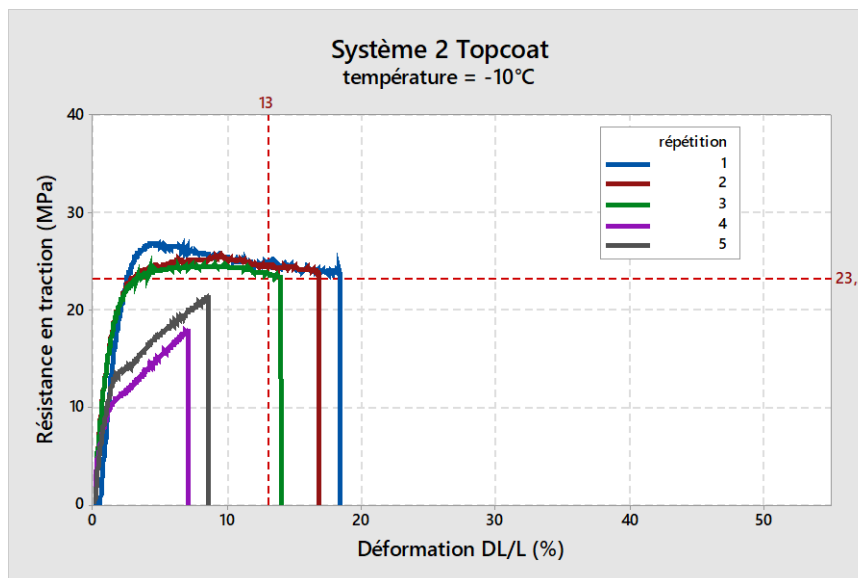
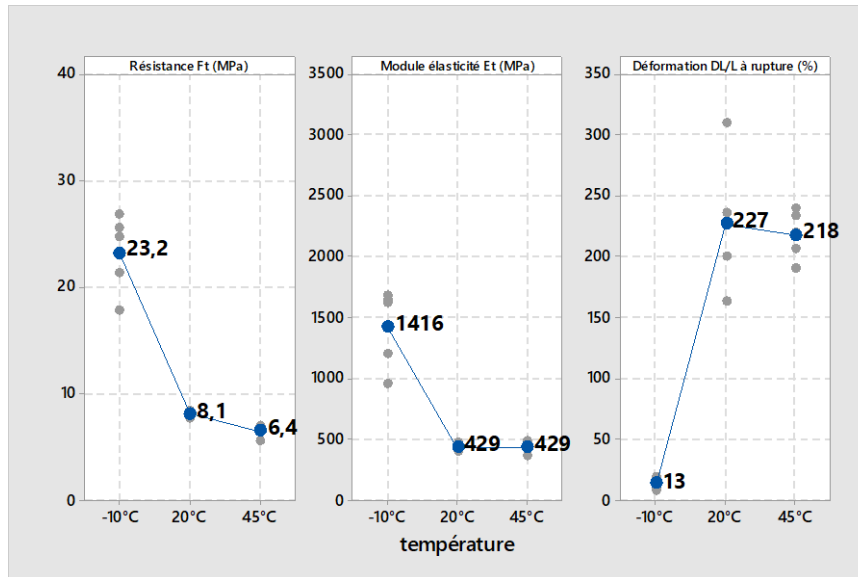




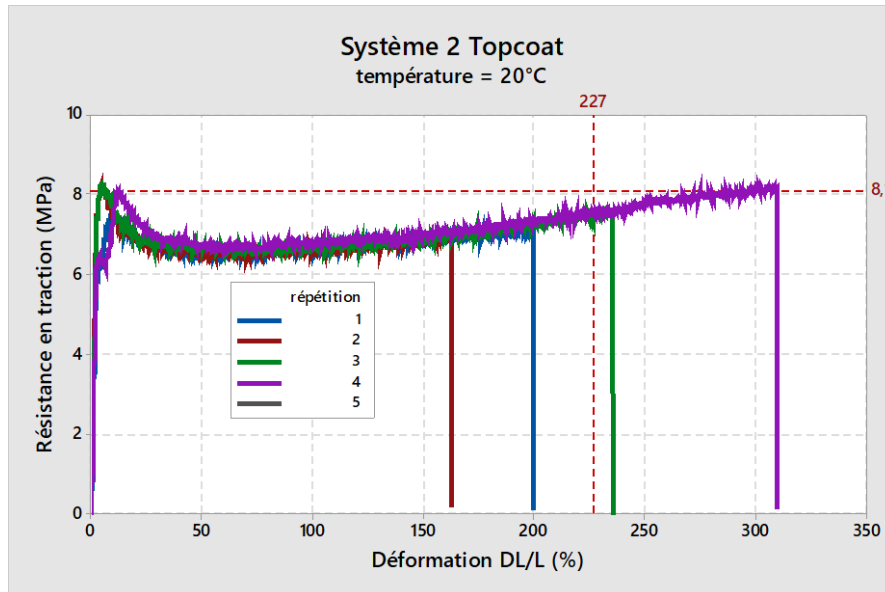


## 7.4 Système 2 – Topcoat

Variable	température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft résistance en traction (MPa)	-10°C	5	23,2	16
	20°C	4	8,1	4
	45°C	5	6,4	8
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	1416	23
	20°C	4	429	8
	45°C	5	429	10
Delta L / L à Fmax (%)	-10°C	5	8	26
	20°C	4	7	39
	45°C	5	6	60
Delta L / L à rupture (%)	-10°C	5	13	38
	20°C	4	227	28
	45°C	5	218	9
Epaisseur b (mm)	-10°C	5	0,106	5
	20°C	4	0,100	0
	45°C	5	0,102	4

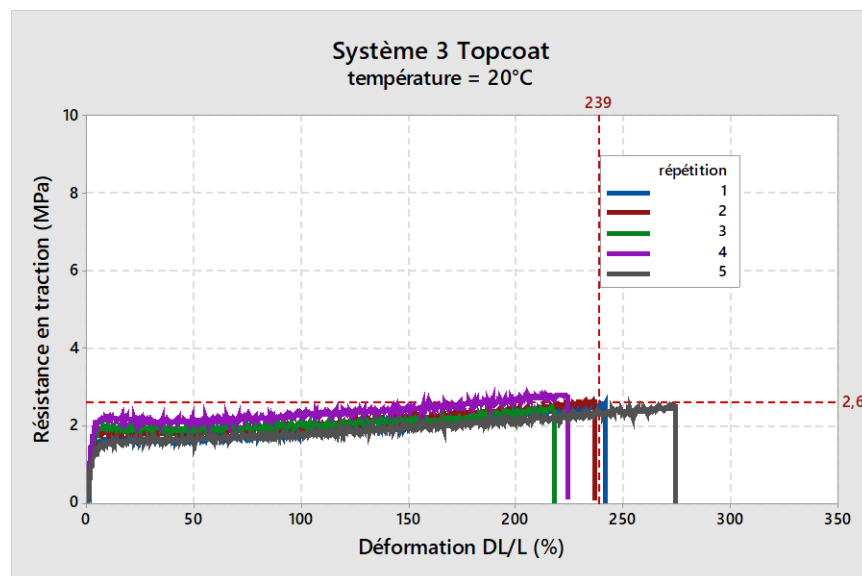
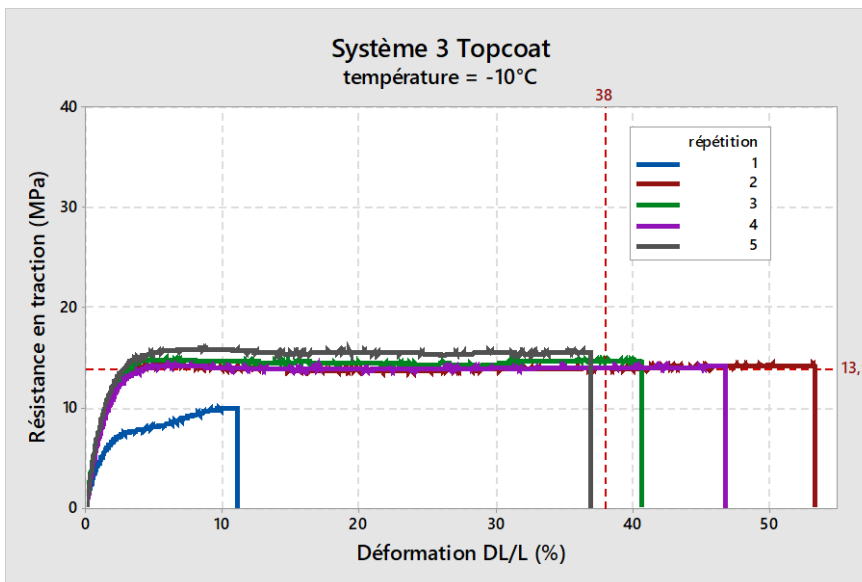
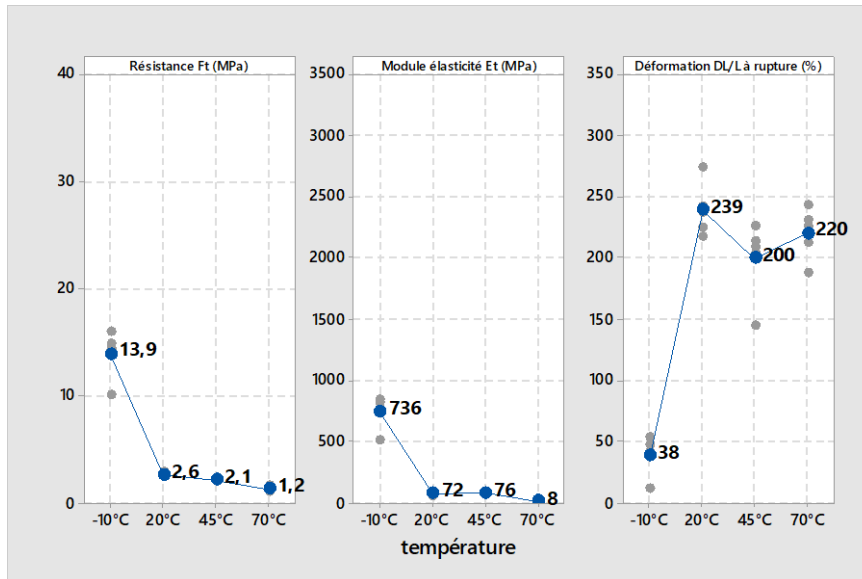


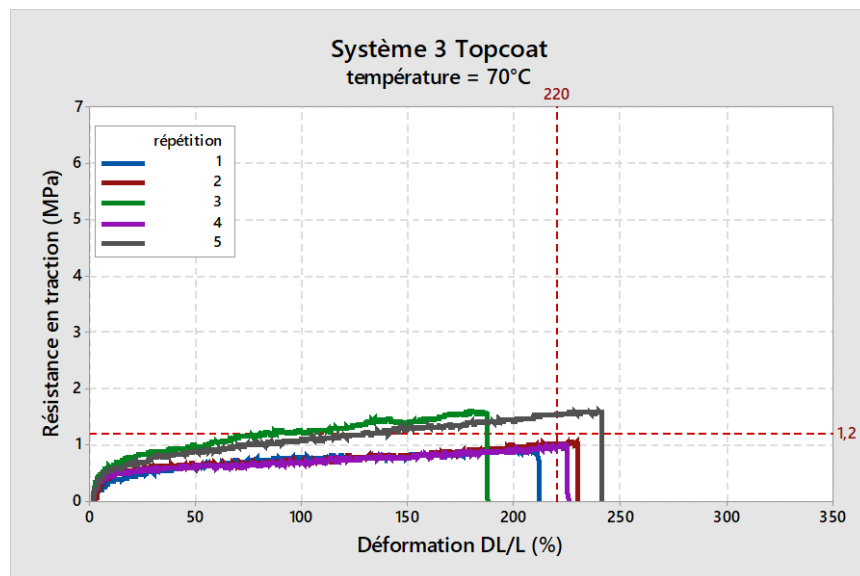
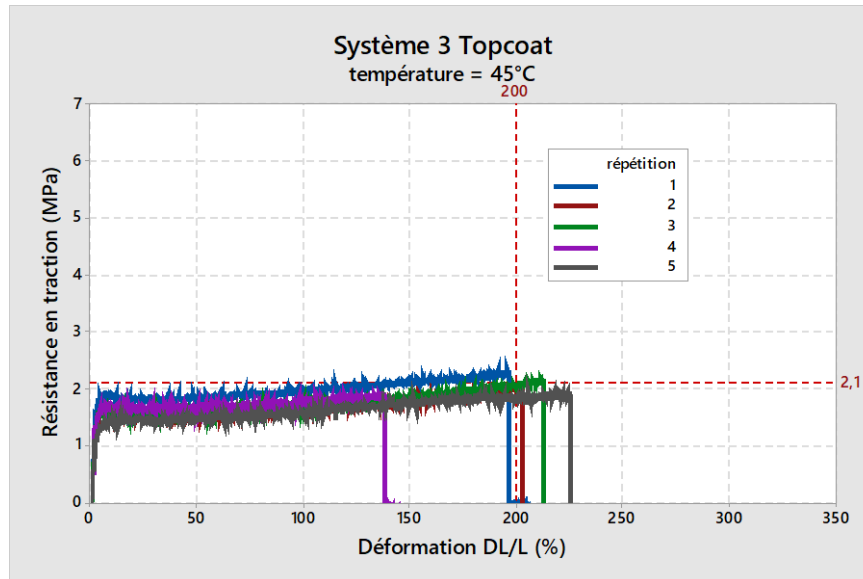




## 7.5 Système 3 – Topcoat

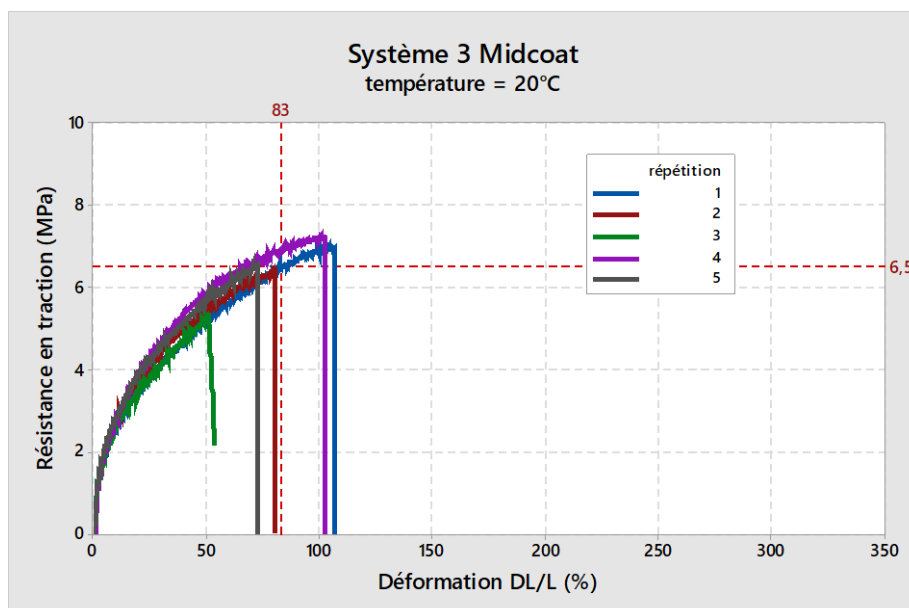
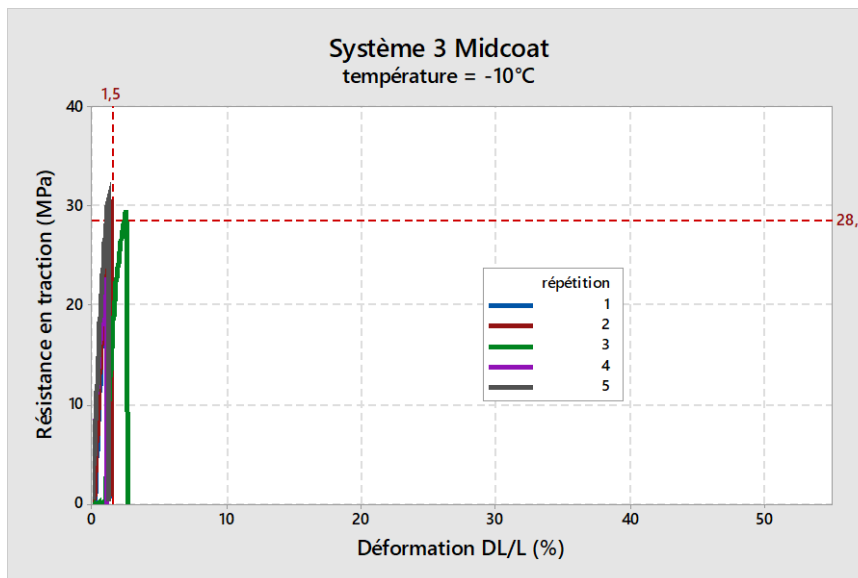
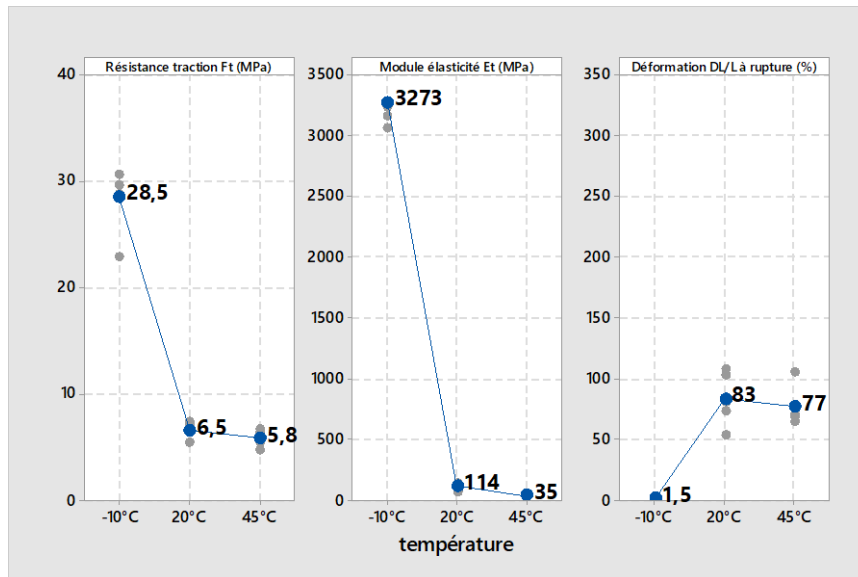
Variable	température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft résistance en traction (MPa)	-10°C	5	13,9	16
	20°C	5	2,6	6
	45°C	5	2,1	8
	70°C	5	1,2	27
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	736	18
	20°C	5	72	27
	45°C	5	76	9
	70°C	5	8	45
Déformation DL / L à F max (en %)	-10°C	5	7	34
	20°C	5	238	9
	45°C	5	193	17
	70°C	5	215	11
Déformation DL / L à F rupture (en %)	-10°C	5	38	43
	20°C	5	239	9
	45°C	5	200	16
	70°C	5	220	10
Epaisseur film b (mm)	-10°C	5	0,158	3
	20°C	5	0,174	5
	45°C	5	0,166	3
	70°C	5	0,118	15

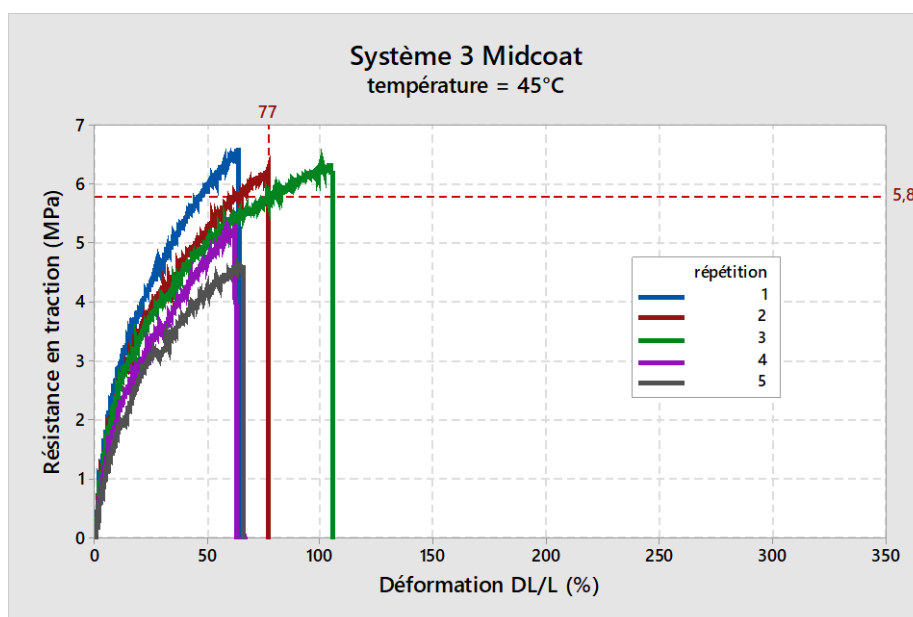




## 7.6 Système 3 – Midcoat

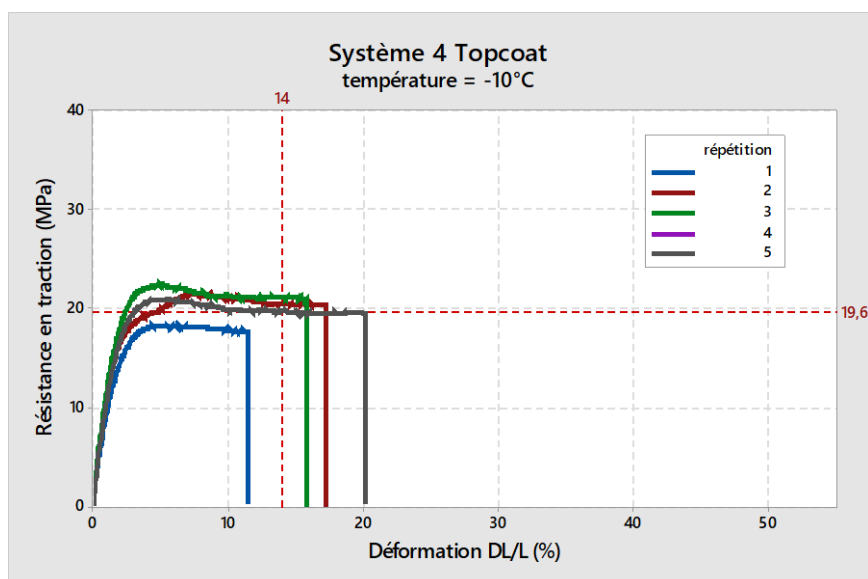
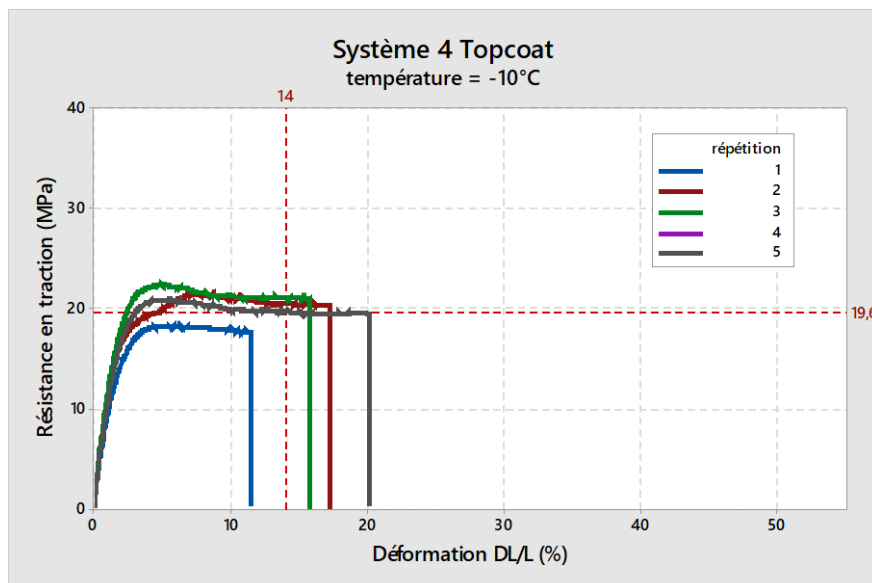
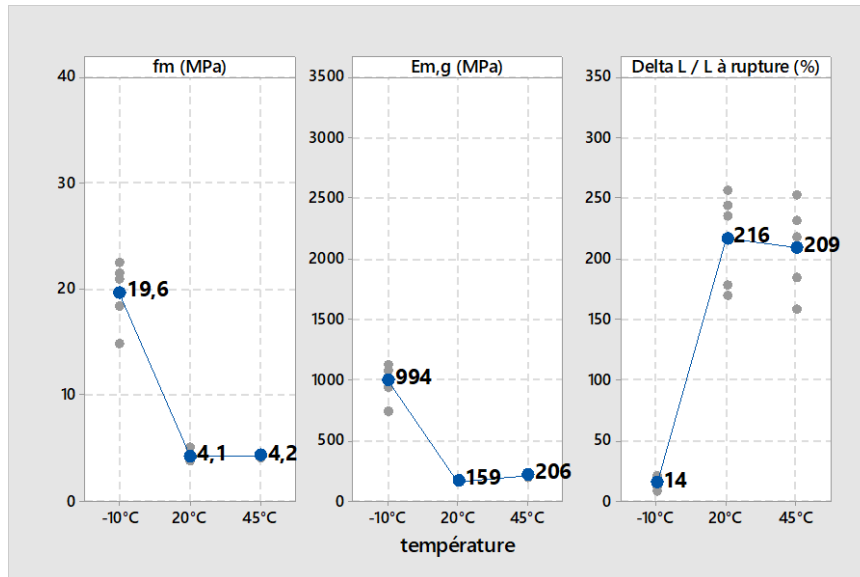
Variable	température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft (résistance en traction (MPa))	-10°C	5	28,5	11
	20°C	5	6,5	11
	45°C	5	5,8	14
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	3273	7
	20°C	5	114	26
	45°C	5	35	18
Delta L / L à F max (%)	-10°C	5	1	42
	20°C	5	81	27
	45°C	5	74	25
Delta L / L à rupture (%)	-10°C	5	1,5	41
	20°C	5	83	26
	45°C	5	77	22
Epaisseur b (mm)	-10°C	5	0,116	5
	20°C	5	0,136	7
	45°C	5	0,122	4

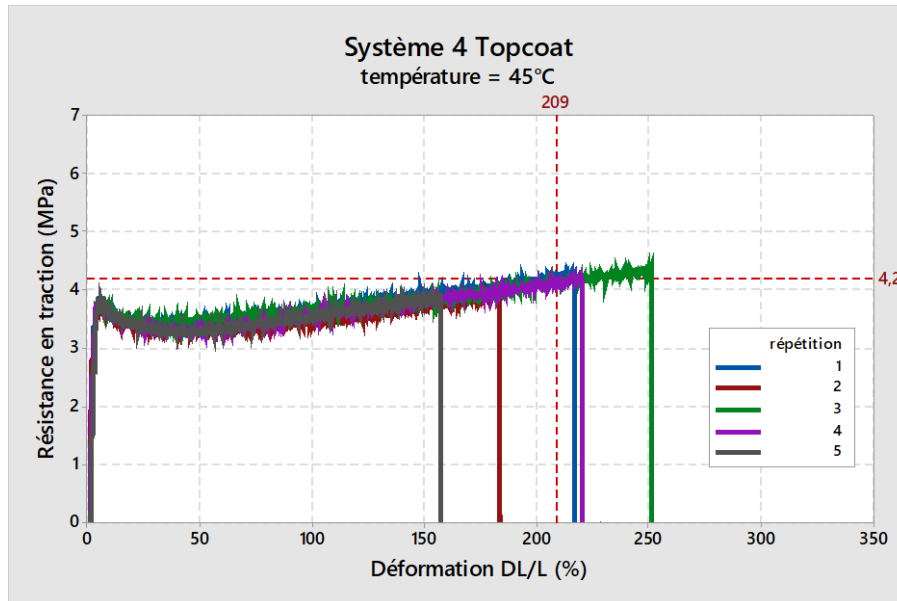




## 7.7 Système 4 – Topcoat

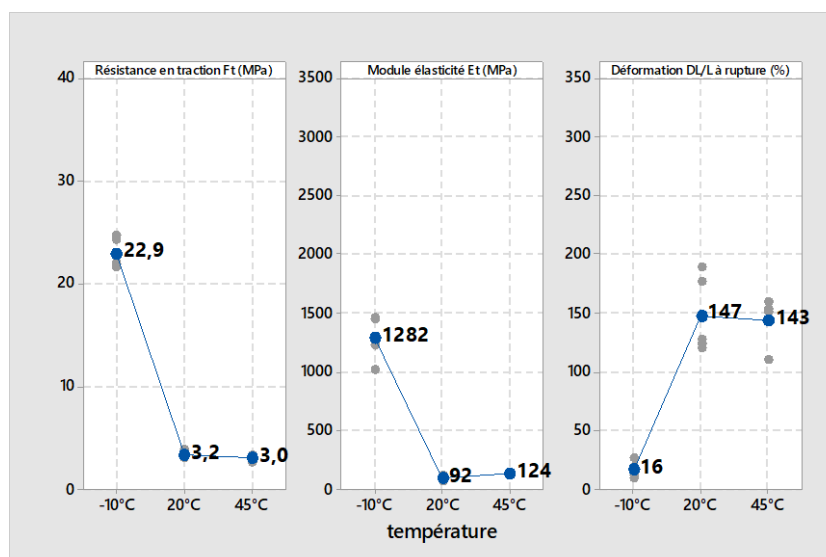
Variable	température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft (résistance en traction MPa) (MPa)	-10°C	5	19,6	16
	20°C	5	4,1	12
	45°C	5	4,2	5
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	994	17
	20°C	5	159	6
	45°C	5	206	7
Delta L / L à F max (%)	-10°C	5	6	17
	20°C	5	215	20
	45°C	5	204	17
Delta L / L à rupture (%)	-10°C	5	14	36
	20°C	5	216	18
	45°C	5	209	18
Epaisseur b (mm)	-10°C	5	0,150	5
	20°C	5	0,160	4
	45°C	5	0,136	10

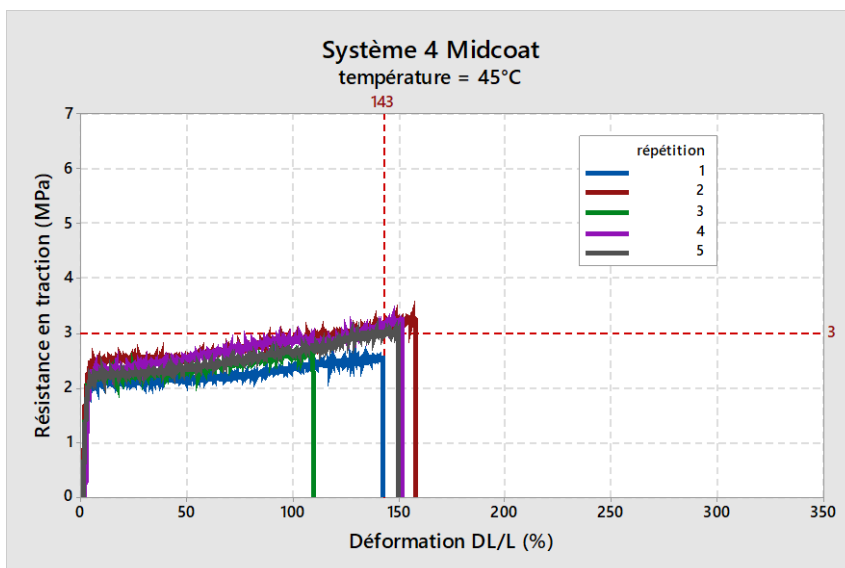
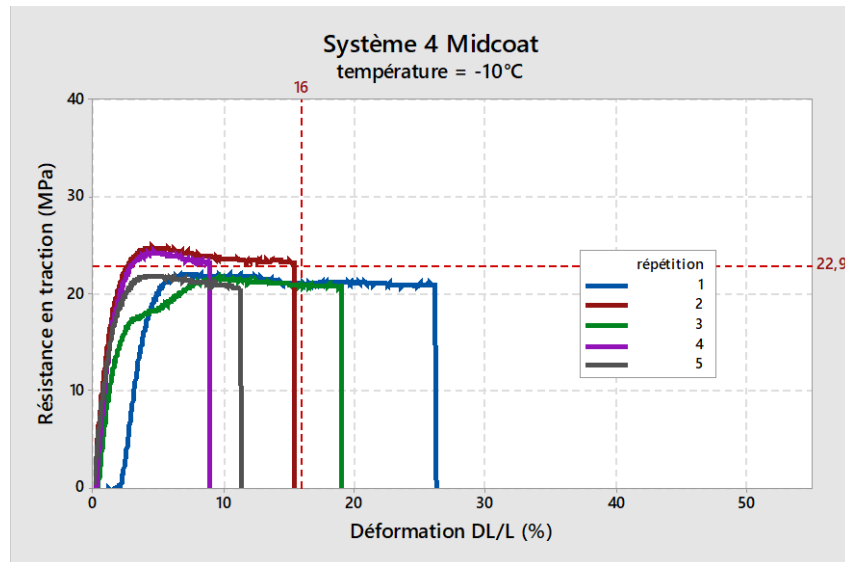
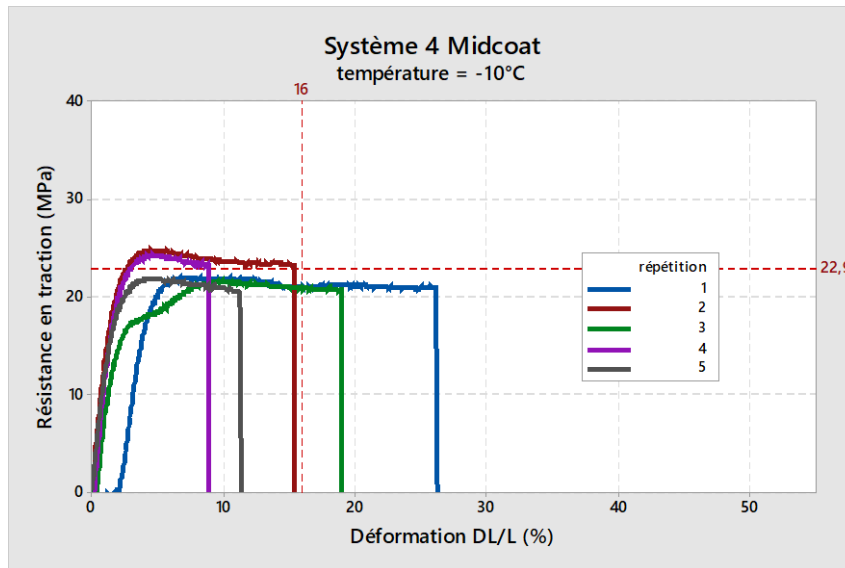




## 7.8 Système 4 - Midcoat

Variable	température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft (résistance en traction MPa) (MPa)	-10°C	5	22,9	7
	20°C	5	3,2	10
	45°C	5	3,0	11
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	1282	14
	20°C	5	92	20
	45°C	5	124	4
Delta L / L à Ft (résistance en traction MPa)ax (%)	-10°C	5	6	36
	20°C	5	141	26
	45°C	5	140	15
Delta L / L à rupture (%)	-10°C	5	16	42
	20°C	5	147	22
	45°C	5	143	13
Epaisseur b (mm)	-10°C	5	0,130	0
	20°C	5	0,164	5
	45°C	5	0,156	6

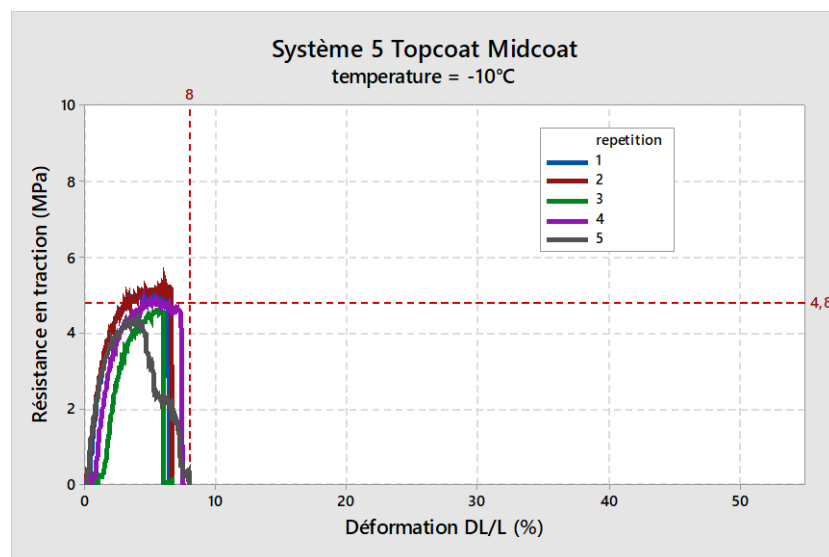
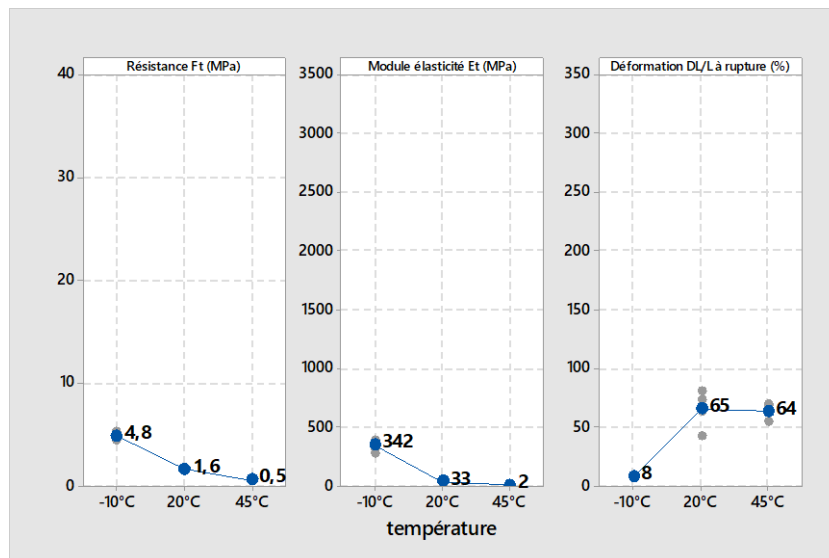


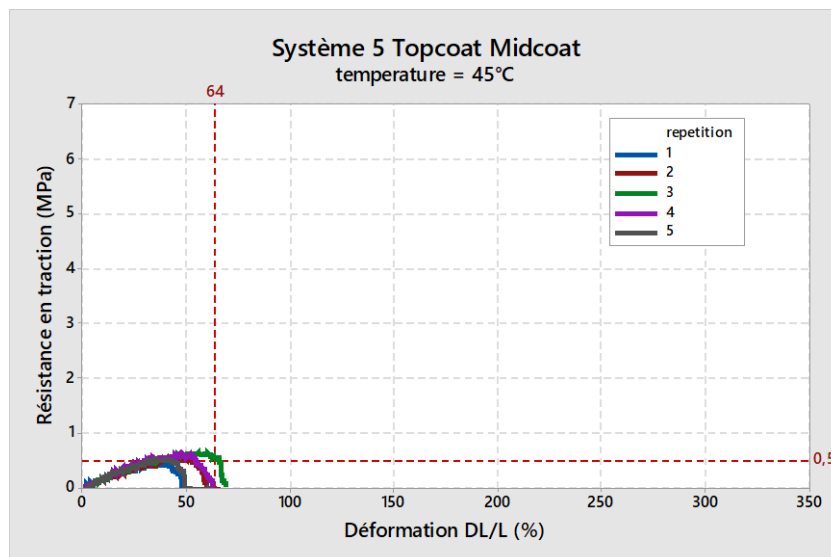
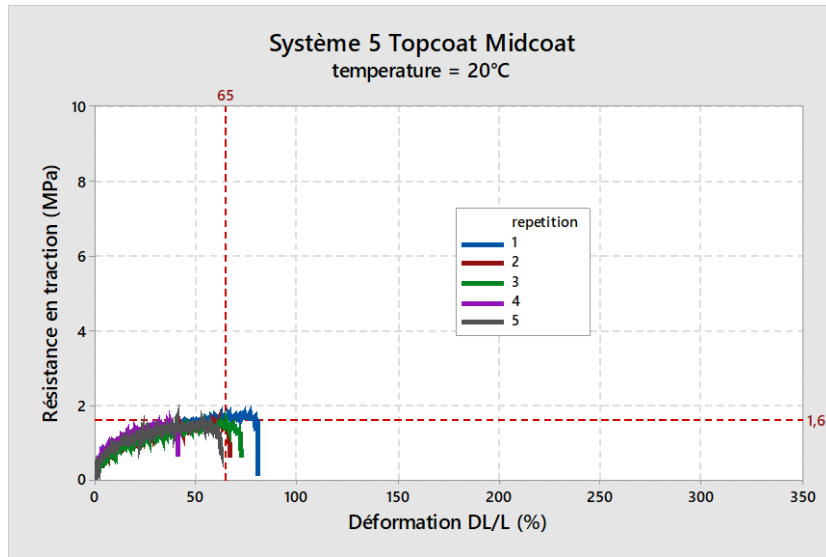




## 7.9 Système 5 - Topcoat – Midcoat

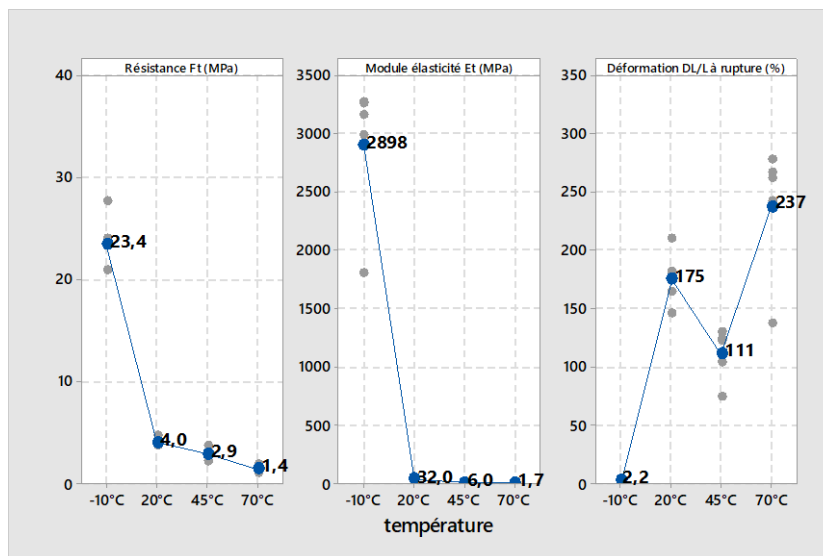
Variable	température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft résistance en traction (MPa)	-10°C	5	4,8	7
	20°C	5	1,6	6
	45°C	5	0,5	15
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	342	13
	20°C	5	33	33
	45°C	5	2	13
Déformation DL / L à F max (en %)	-10°C	5	5	16
	20°C	5	53	26
	45°C	5	45	14
Déformation DL / L à F rupture (en %)	-10°C	5	8	10
	20°C	5	65	22
	45°C	5	64	10
Epaisseur film b (mm)	-10°C	5	0,132	10
	20°C	5	0,132	6
	45°C	5	0,114	5

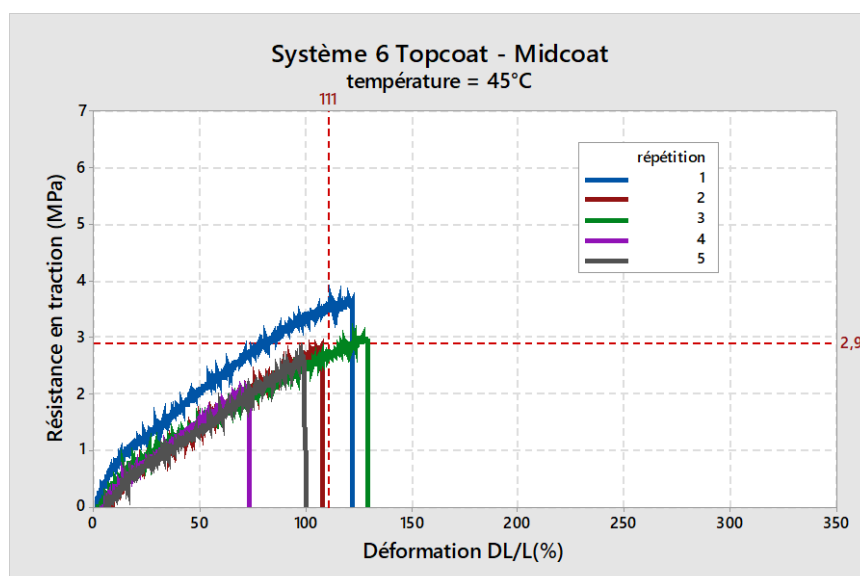
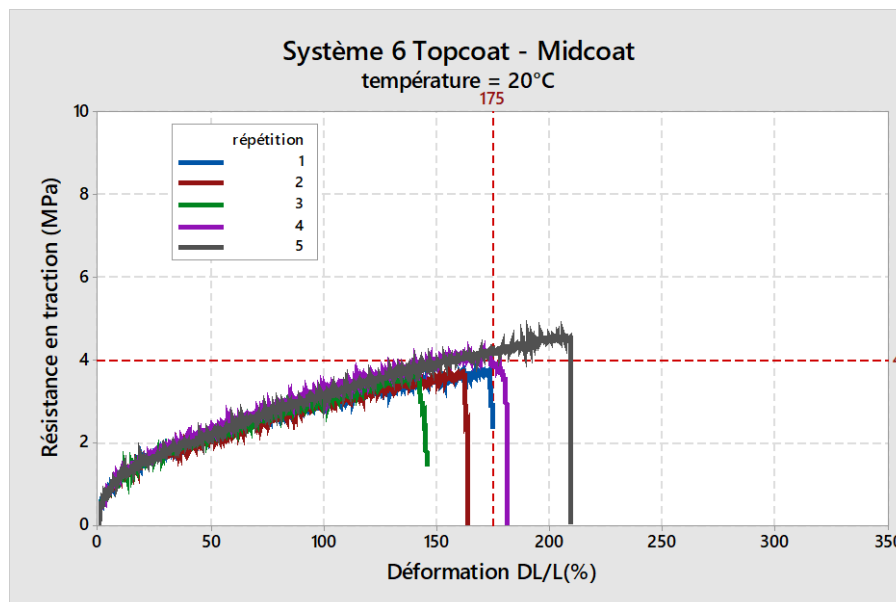
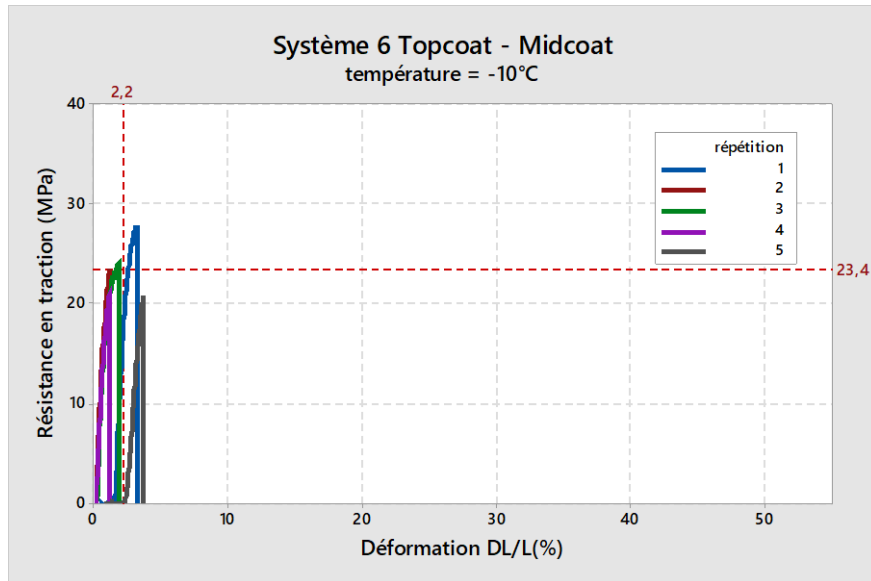


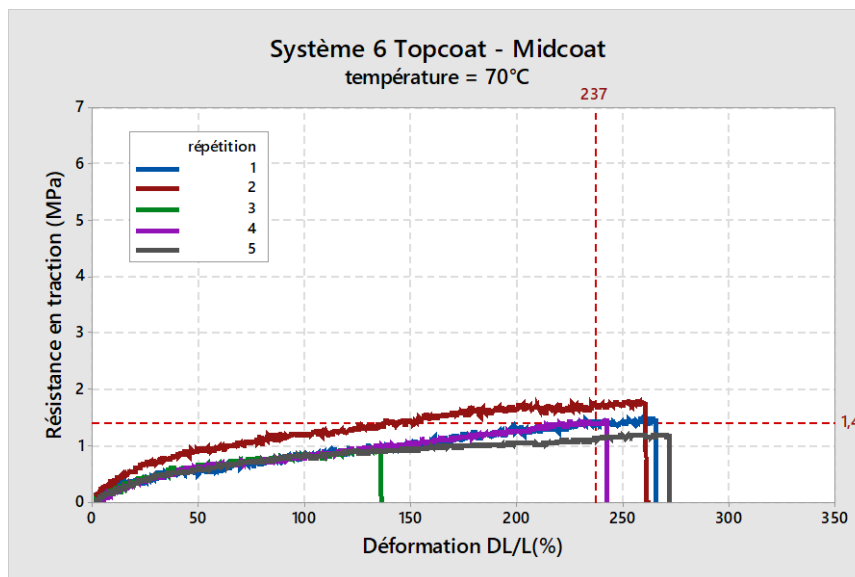


## 7.10 Système 6 - Topcoat - Midcoat

Variable	Température	Nb réplique	Moyenne	VarCoeff
Ft résistance en traction (MPa)	-10°C	5	23,4	12
	20°C	5	4,0	10
	45°C	5	2,9	19
	70°C	5	1,4	24
Et Module d'élasticité en traction (MPa)	-10°C	5	2898	21
	20°C	5	32,0	21
	45°C	5	6,0	27
	70°C	5	1,7	41
Déformation DL / L à F max (en %)	-10°C	5	2,2	53
	20°C	5	170,4	14
	45°C	5	104,1	20
	70°C	5	232,4	24
Déformation DL / L à F rupture (en %)	-10°C	5	2,2	52
	20°C	5	175	13
	45°C	5	111	21
	70°C	5	237	24
Epaisseur film b (mm)	-10°C	5	0,114	8
	20°C	5	0,110	0
	45°C	5	0,112	10
	70°C	5	0,142	9







## 7.11 Synthèse des données pour les midcoats

Système	Donnée	Résistance Ft (MPa)			Module élasticité Et (MPa)			DL/L à rupture (%)		
		-10°C	20°C	45°C	-10°C	20°C	45°C	-10°C	20°C	45°C
1	Moyenne	31,6	5,3	1,5	1731	259	0,7	22,1	209	277
	Minimum	15,3	4,6	0,7	613	221	0,4	3,6	158	250
	Maximum	38,6	5,9	1,9	2447	291	1,4	69,6	253	337
3	Moyenne	28,5	6,5	5,8	3273	114	35	1,5	83	77
	Minimum	22,9	5,4	4,6	3057	66	25	1,1	54	64
	Maximum	30,6	7,3	6,6	3649	137	41	2,6	107	105
4	Moyenne	22,9	3,2	3,0	1282	92	124	16,2	147	143
	Minimum	21,6	3,0	2,6	1016	63	117	9,0	120	110
	Maximum	24,8	3,8	3,3	1453	105	128	26,2	189	159
5	Moyenne	4,8	1,6	0,5	342	33	1,6	7,6	65	64
	Minimum	4,4	1,5	0,4	276	18	1,4	6,8	42	54
	Maximum	5,3	1,8	0,6	383	45	1,9	8,7	81	69
6	Moyenne	23,4	4,0	2,9	2898	32	6,0	2,2	175	111
	Minimum	20,9	3,7	2,1	1805	25	4,1	1,2	146	74
	Maximum	27,6	4,6	3,7	3269	41	8,4	3,7	210	130
Total	Moyenne	22,2	4,1	2,8	1905	106	33	9,9	136	134
	Minimum	4,4	1,5	0,4	276	18	0,4	1,2	42	54
	Maximum	38,6	7,3	6,6	3649	291	128	69,6	253	337

Tableau 3 : Moyenne, minimum et maximum de la résistance à la traction, du module d'élasticité, de la déformation à la rupture à -10°C, 20°C, 45°C pour les midcoats.

## 7.12 Synthèse des données pour les topcoats

Système	Donnée	Résistance Ft (MPa)			Module élasticité Et (MPa)			DL/L à rupture (%)		
		-10°C	20°C	45°C	-10°C	20°C	45°C	-10°C	20°C	45°C
1	Moyenne	14,5	4,2	3,0	1084	251	134	8,0	85	133
	Minimum	11,5	3,9	2,8	839	190	112	4,4	61	100
	Maximum	18,3	4,3	3,2	1238	281	152	15,0	107	175
2	Moyenne	23,2	8,1	6,4	1416	429	429	13,0	227	218
	Minimum	17,8	7,6	5,6	949	392	360	7,1	163	191
	Maximum	26,8	8,3	6,9	1679	467	480	18,4	310	240
3	Moyenne	13,9	2,6	2,1	736	72	76	37,8	239	200
	Minimum	10,0	2,5	1,9	507	48	69	11,0	218	145
	Maximum	15,9	2,8	2,3	837	92	84	53,4	275	226
4	Moyenne	19,6	4,1	4,2	994	159	206	14,3	216	209
	Minimum	14,8	3,8	4,0	732	143	190	6,8	170	158
	Maximum	22,5	5,0	4,4	1120	168	223	20,1	256	253
5	Moyenne	4,8	1,6	0,5	342	33	1,6	7,6	65	64
	Minimum	4,4	1,5	0,4	276	18	1,4	6,8	42	54
	Maximum	5,3	1,8	0,6	383	45	1,9	8,7	81	69
6	Moyenne	23,4	4,0	2,9	2898	32	6,0	2,2	175	111
	Minimum	20,9	3,7	2,1	1805	25	4,1	1,2	146	74
	Maximum	27,6	4,6	3,7	3269	41	8,4	3,7	210	130
Total	Moyenne	16,6	4,0	3,2	1245	153	142	13,8	166	156
	Minimum	4,4	1,5	0,4	276	18	1,4	1,2	42	54
	Maximum	27,6	8,3	6,9	3269	467	480	53,4	310	253

Tableau 4 : Moyenne, minimum et maximum de la résistance à la traction, du module d'élasticité, de la déformation à la rupture à -10°C, 20°C, 45°C pour les topcoats.

## Outil technologique reconnu

FCBA et ses équipes d'experts accompagnent les entreprises des filières forêt-bois et ameublement dans l'amélioration de leur compétitivité sur leur marché

L'Institut met à disposition de ces entreprises le savoir-faire de ses ingénieurs et techniciens et la technologie de ses laboratoires, accompagne les professionnels dans la normalisation, l'amélioration de la qualité de leurs produits et les aide à intégrer les innovations technologiques. FCBA diffuse également de l'information scientifique et technique, fruit de son expertise en recherche et développement et veille technologique, économique et documentaire.

### Aide à la conception et à l'innovation

Concevoir et construire avec le bois, respecter les normes et la réglementation. Pour l'ameublement, concevoir par l'usage et proposer des matériaux innovants avec le centre de ressources INNOVATHEQUE.

### R & D

Être le porteur de l'innovation technologique pour permettre le développement des entreprises.

### Centre de formation

Développer votre savoir-faire et vos compétences avec nos formations catalogue ou sur-mesure.

### Bureau de normalisation

Animer et coordonner les travaux de normalisation du bois et des produits dérivés du bois et de l'ameublement.

### Organisme certificateur

Marquage CE/RPC, CTB, NF, OFG, PEFC, FSC...

### Laboratoires à la pointe

Chimie, physique, mécanique, biologie, finition, feu, biosourcés, matériaux...



INSTITUT  
TECHNOLOGIQUE

## Pour nous rejoindre

---

### SIÈGE SOCIAL

10, rue Galilée  
77420 Champs-sur-Mame  
+33 (0)1 72 84 97 84

---

### BORDEAUX

Allée de Boutaut - BP227  
33028 Bordeaux Cedex  
+33 (0)5 56 43 63 00

---

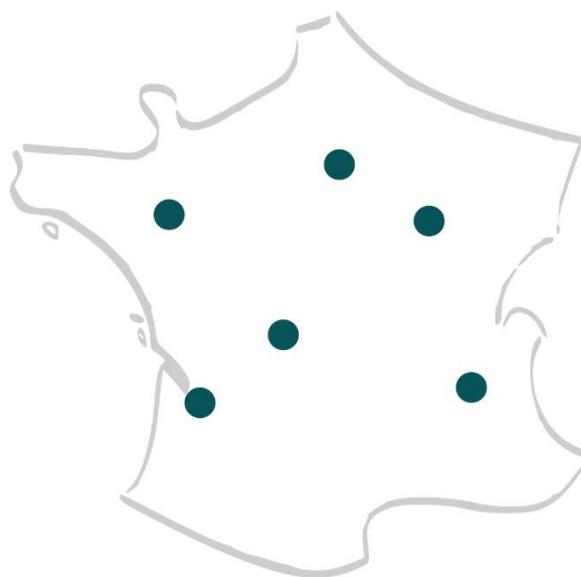
### GRENOBLE

Domaine Universitaire  
CS 90251  
38044 Grenoble Cedex 9  
+33 (0)4 56 85 25 30

---

### CESTAS-PIERROTON

71, route d'Arcachon  
33610 Cestas  
+33 (0)5 56 79 95 00



### NANTES

15, boulevard Léon Bureau  
44200 Nantes  
+33 (0)6 80 34 38 63

---

### CHARREY-SUR-SAÔNE

60, route de Bonnencontre  
21170 Charrey-sur-Saône  
+33 (0)3 80 36 36 20

---

### VERNEUIL-SUR-VIENNE

Domaine des Vaseix  
87430 Verneuil-sur-Vienne  
+33 (0)5 55 48 48 10



[fcba.fr](http://fcba.fr)

---

