
Caractérisation de l'interaction équipements d'infusion-pièce

Les premiers résultats expérimentaux laissent penser que l'interaction équipement d'infusion-pièce est responsable d'une majorité des déformations obtenus. Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord nous attacher à identifier de façon certaine cette source de déformations spécifique. Dans un second temps, nous proposons d'évaluer expérimentalement le rôle et la sensibilité de paramètres produit procédé ressources sur ce mécanisme de déformation afin d'en améliorer sa compréhension.

III.1 Identification du mécanisme

Afin de corroborer ces résultats préliminaires, Il faudrait supprimer/minimiser l'interaction équipements d'infusion-pièce. Une imprégnation frontale sans équipements d'infusion est possible, mais il serait difficile de tirer des conclusions dans la mesure où les conditions limites seraient modifiées (répartition du champ de pression). Une solution consiste à utiliser un film démoulant perforé à la place du tissu d'arrachage conventionnel.

Le gauchissement de l'essai avec le film perforé n'a pu être mesuré avec ses équipements d'infusion car ceux-ci sont partiellement, voir totalement, désolidarisés de la pièce après refroidissement. Le comparatif des gauchissements de pièce avec et sans l'influence de l'interaction équipements d'infusion-pièce est présenté sur la Figure 30. Avec l'utilisation du film démoulant perforé, la déformation de la pièce est, contrairement à la pièce réalisée avec un tissu de délaminage conventionnel, concave par rapport à l'outillage avec une amplitude maximale importante. Dans ce cas, le mécanisme de déformation dominant est l'interaction pièce-outillage conformément aux résultats de la littérature.

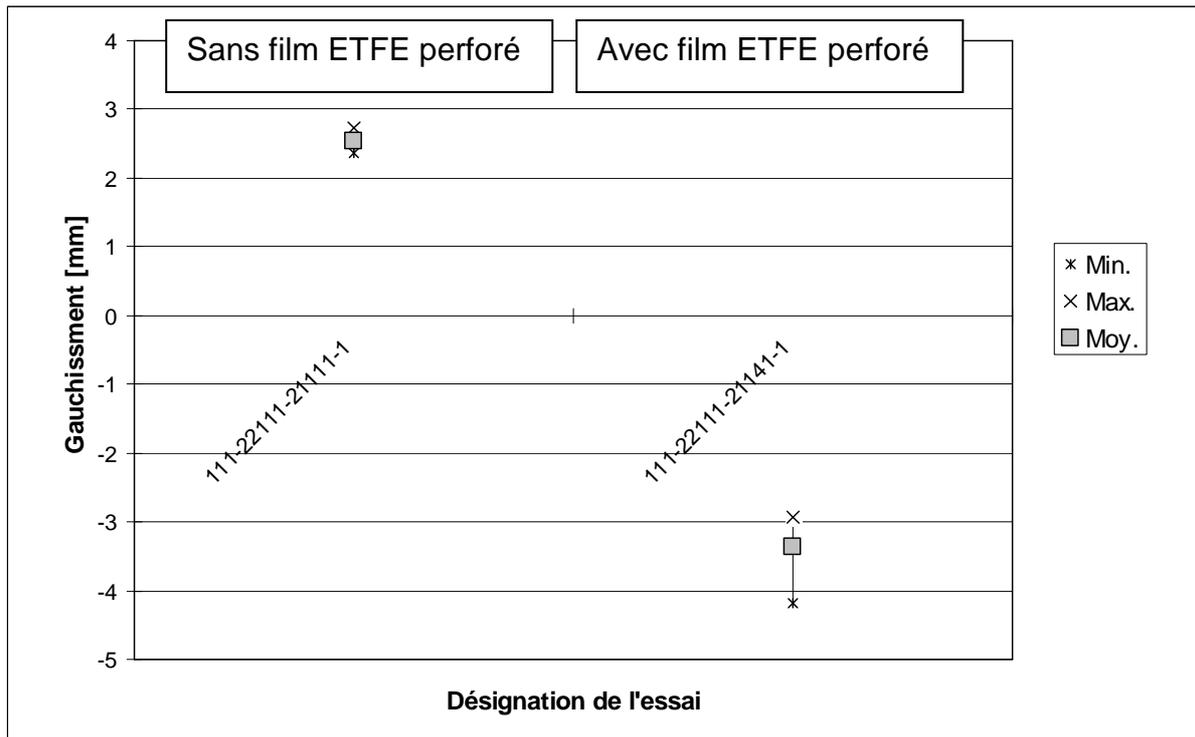


Figure 30: Gauchissement avec et sans film ETFE perforé

→ Le rôle des équipements d'infusion est confirmé expérimentalement. L'interaction équipements d'infusion-pièce peut être minimisé/supprimé par l'utilisation d'un film démoulant perforé à la place du tissu de délaminage.

La maîtrise industrielle des mécanismes de déformation passe obligatoirement par une compréhension des phénomènes en présence. Plusieurs interrogations se posent concernant ce mécanisme de déformation spécifique aux procédés d'infusion. Le degré d'influence des paramètres produit-procédé-processus-ressources ainsi que les secteurs du cycle critique sont à identifier afin d'entrevoir la possibilité de développement de modèles de prédiction.

III.2 Paramètres procédé

Cycle de polymérisation

III.2.1.1 Cinétique de montée en température

La variation de la cinétique de montée en température a des conséquences à deux niveaux. Tout d'abord, la cinétique de chauffe entraîne une augmentation de la cinétique de polymérisation. Ainsi, l'évolution du retrait de polymérisation s'en trouve modifiée. Dans un deuxième temps, la variation de la cinétique de montée en température entraîne une augmentation de la contrainte de cisaillement à l'interface pièce-outillage [10] par l'augmentation de la vitesse relative de déplacement pièce-outillage. La Figure 31 présente l'influence de la cinétique de montée en température sur le gauchissement.

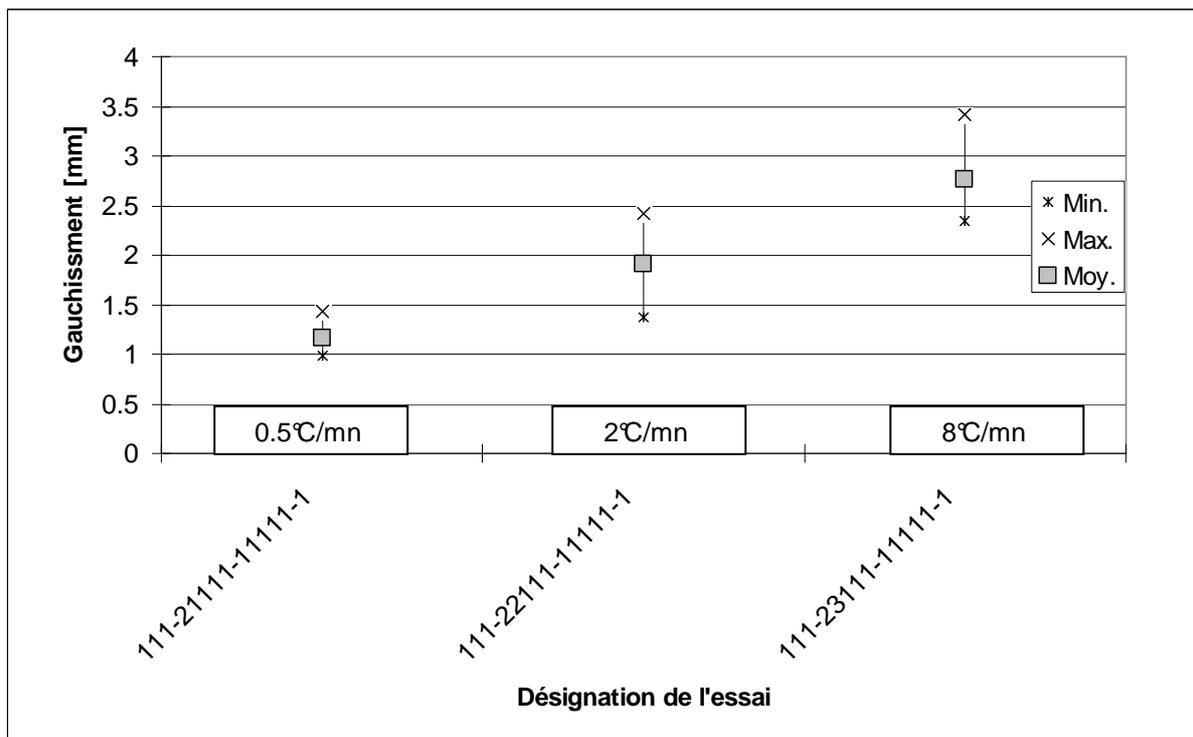


Figure 31: Influence de la cinétique de montée en température sur le gauchissement

On observe que le gauchissement croît concomitamment (Cf. Figure 32) avec la cinétique de montée en température. Deux séries d'essais, dont les paramètres opératoires sont strictement identiques hormis la variation de la cinétique de montée en

température passée de 0.5 à 8°C/min, présentent un gauchissement du simple au double.

La cinétique de chauffe agissant sur aux moins deux facteurs, il n'est pas possible de tirer plus de conclusions en l'état sur la contribution sur la déformation de ces facteurs.

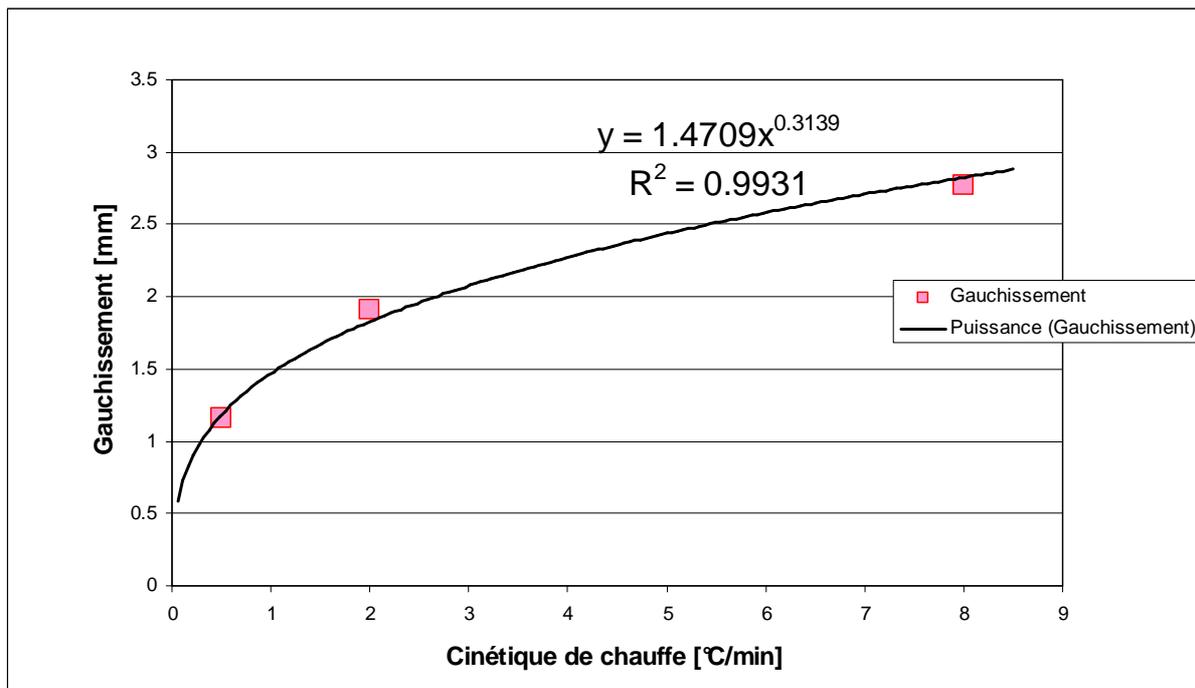


Figure 32: Gauchissement en fonction de la cinétique de chauffe

Sur la Figure 33, on remarque que le gauchissement des pièces avec ses équipements d'infusion croît également avec l'augmentation de la cinétique de montée en température. La tendance est cependant nettement moins marquée que pour le gauchissement de pièces sans équipements d'infusion. La différence pourrait s'expliquer par l'augmentation du retrait total de polymérisation avec l'augmentation de la cinétique de montée en température.

Le ratio entre le gauchissement sans et avec les équipements d'infusion est un moyen de représenter le degré de contraintes transmises par rapport aux conditions opératoires. Ce ratio croît selon une loi puissance avec la cinétique de montée en température (Cf. Figure 34). La vitesse de déformation joue un rôle prépondérant dans la détermination du transfert de contraintes équipements d'infusion-pièce. Cette

déformation résulte du différentiel de retrait de polymérisation et le différentiel de coefficient de dilatation entre les équipements et la pièce. La contribution de chaque phénomène physique ne peut être déterminée ici car la mesure de gauchissement ne permet d'observer qu'un niveau de la contrainte transmise à la fin du cycle.

→ La cinétique de chauffe est un paramètre non négligeable dans la détermination du transfert de contraintes équipements d'infusion-pièce.

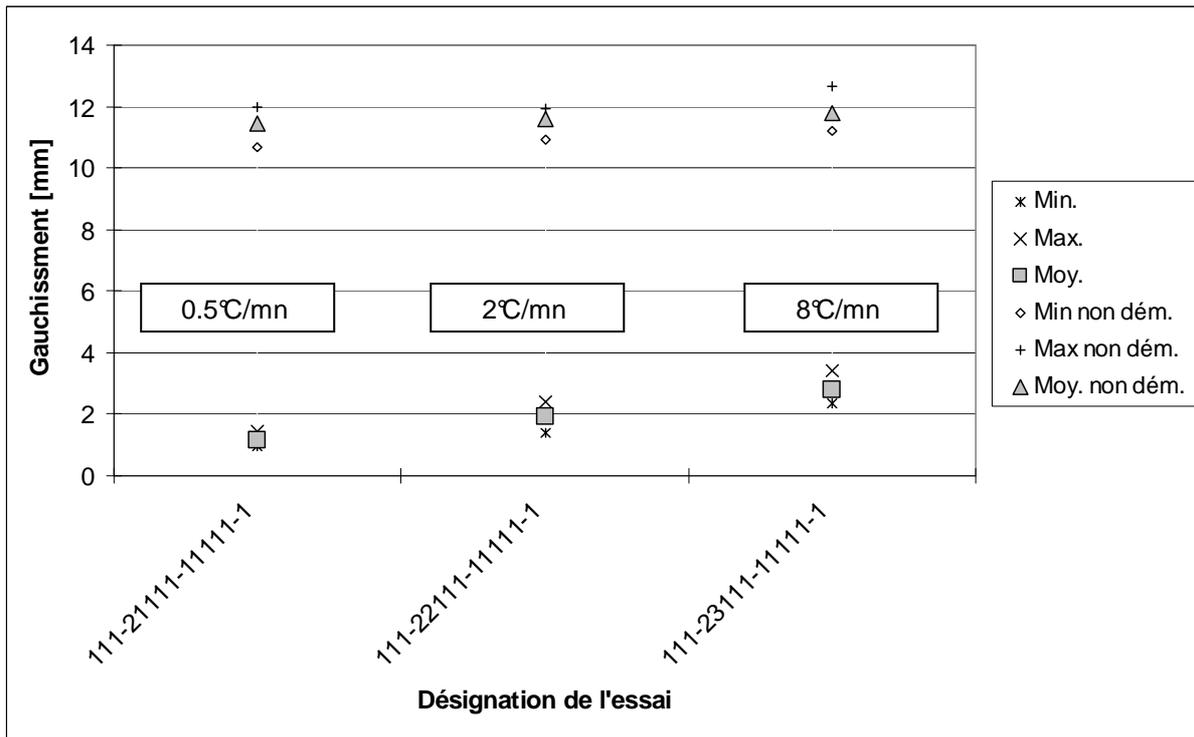


Figure 33: Influence de la cinétique de chauffe sur le gauchissement avant et après retrait des équipements d'infusion

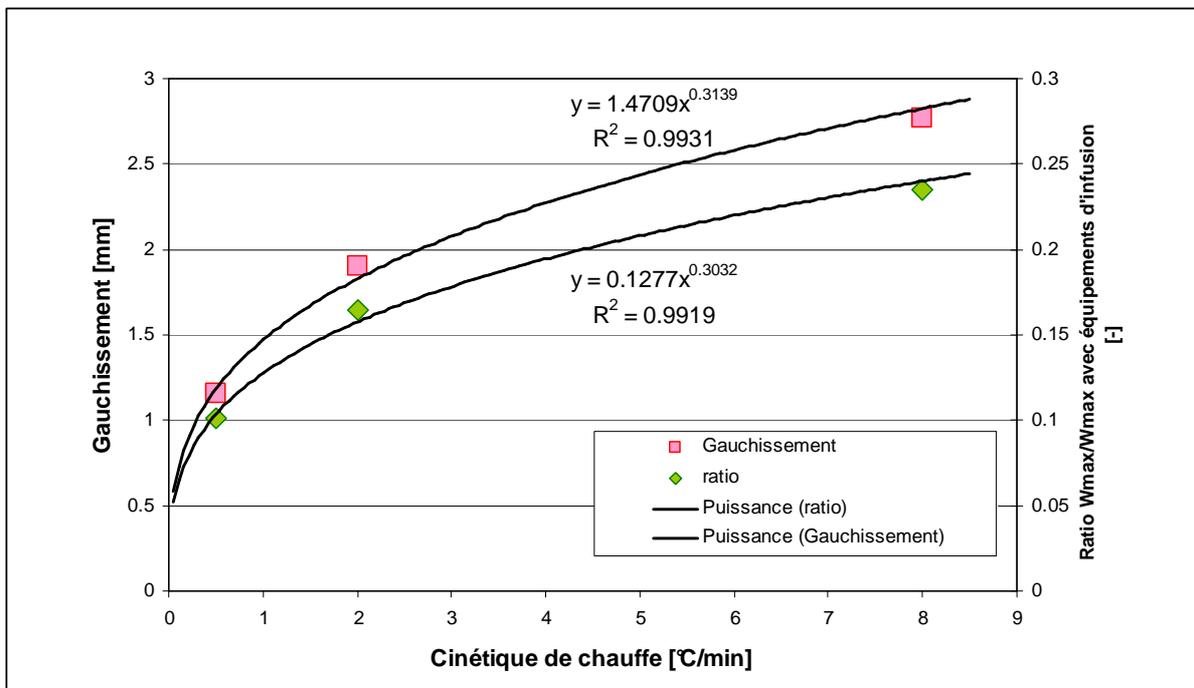


Figure 34: Comparaison gauchissement pièce et ratio

III.2.1.2 Cinétique de refroidissement

La littérature (Cf. II.1) a montré que la cinétique de refroidissement est un facteur influant pour la détermination de la géométrie finale de la pièce. Deux séries d'essais ont été réalisées, soumises à deux cinétiques de refroidissement extrême : un refroidissement naturel à l'air ambiant et un refroidissement forcé sous un flux d'eau tempérée. Les gauchissements moyens mesurés sont proposés sur la Figure 35. Le gauchissement moyen des pièces soumis à ces deux cycles n'apparaît pas comme étant affecté. Il est cependant à noter que le gauchissement des pièces avec leurs équipements d'infusion est plus faible (environ 6%) pour une forte cinétique de refroidissement que pour une faible. Devant la différence entre les deux valeurs de cinétique de refroidissement, cet écart n'est pas représentatif d'un impact fort de ce paramètre sur la déformée de la pièce. Avant d'être imputé comme un effet direct de la cinétique de refroidissement, il aurait été nécessaire de s'assurer de l'équivalence de la santé matière des équipements d'infusion.

Une autre hypothèse serait que l'influence de la cinétique de refroidissement influe de manière équivalente sur les deux mécanismes de déformations en concurrence, et que l'impact de la cinétique de refroidissement sur chaque mécanisme tendrait à se compenser. Cette hypothèse paraît toutefois peu probable dans la mesure où nous avons montré que le mécanisme de déformation issue de l'interaction équipements d'infusion-pièce domine largement celui issu de l'interaction pièce outillage. Il est toutefois à noter que le système de refroidissement utilisé ne garantit en aucun cas une homogénéité de température dans l'épaisseur de la pièce. Le refroidissement effectif de l'ensemble est bien plus rapide coté équipement d'infusion que coté outillage. D'autres essais seraient à réaliser pour corroborer ces hypothèses.

| |
|---|
| <p>→ La cinétique de refroidissement n'apparaît pas comme étant un paramètre influent sur les mécanismes de déformation dans le cadre de notre étude.</p> |
|---|

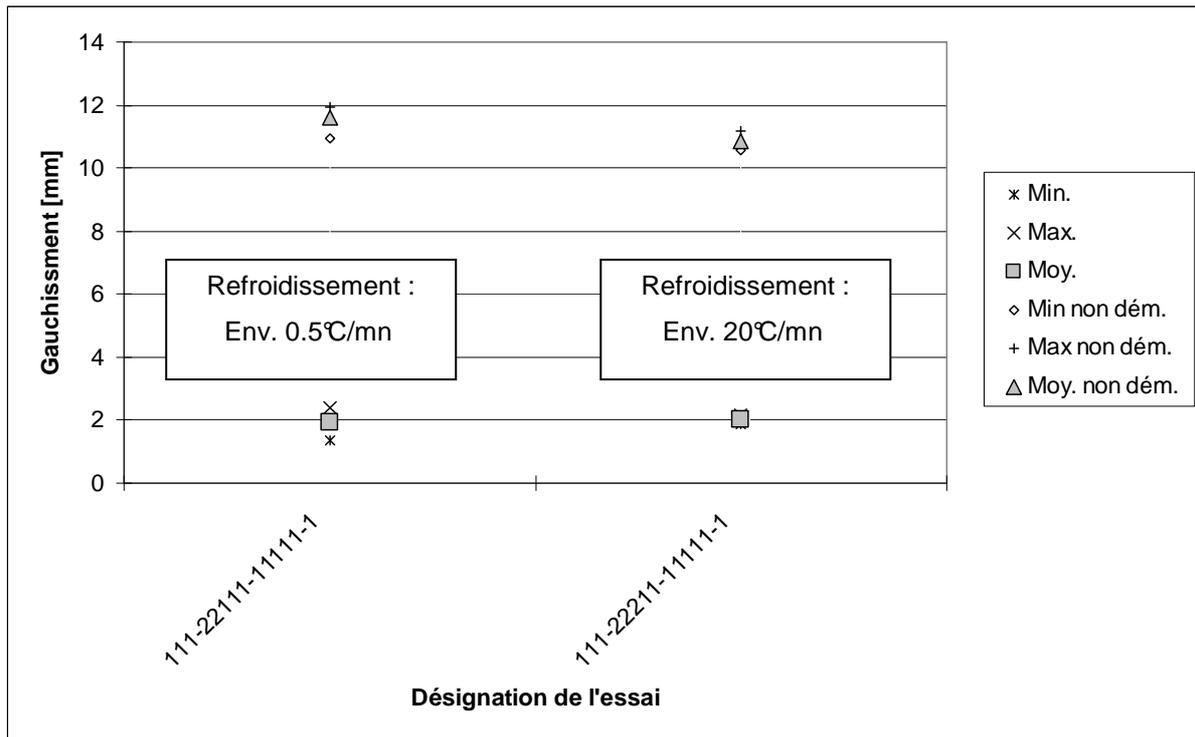


Figure 35: Influence de la cinétique de refroidissement

III.2.1.3 Cas de cycle mono-palier

Un cycle de polymérisation mono-palier permet, dans la mesure où la rampe de montée en température est suffisamment rapide, de s'affranchir d'un transfert de contraintes dans cette phase, engendré par la dilatation différentielle des différents composants de l'ensemble. La résine n'étant pas dans cette phase gélifiée, le transfert de contraintes vers la résine peut être négligé. Le transfert de contraintes vers les fibres résultant de l'interaction pièce-outillage [10] est négligé dans cette analyse.

La Figure 36 présente l'amplitude moyenne de gauchissement de deux séries de pièces soumises à un cycle mono-palier de respectivement 2h à 150°C et 4h à 80°C. Ces deux cycles correspondent à des taux de polymérisation théorique de 1.

Les deux séries d'essais montrent un gauchissement significatif. La contribution du facteur retrait de polymérisation est indéniable. Elle joue un rôle important dans la détermination du gauchissement final.

Le gauchissement pour ce premier cycle est nettement plus prononcé que pour le second. Ce résultat nous montre clairement que la cinétique de polymérisation est un facteur fortement influant. Le retrait évoluant d'une manière complexe, d'autres essais seraient nécessaires pour approfondir la relation entre l'évolution du retrait et le niveau de contraintes transmises.

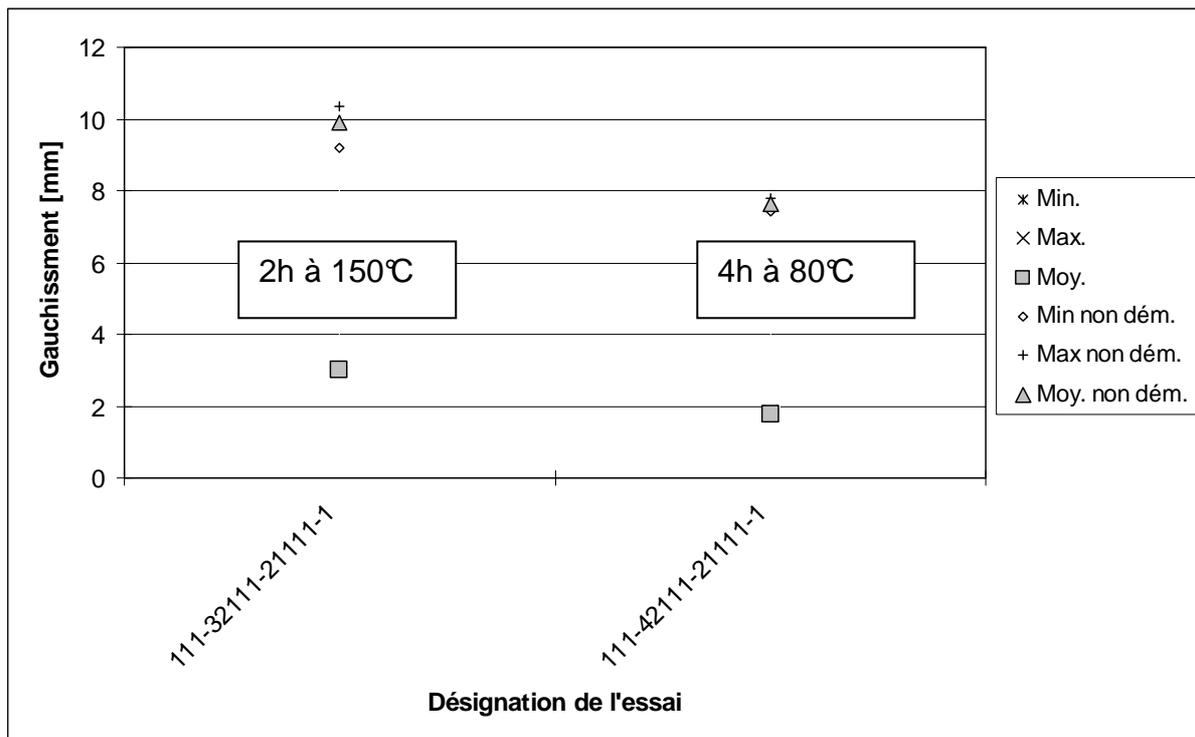


Figure 36: Gauchissements avec/sans équipements d'infusion dans le cas de cycle mono-palier

III.2.1.4 Cas de cycles bi-paliers

Les cycles bi-paliers sont les plus usités pour la polymérisation de pièces hautes performances. Ils permettent de réduire les contraintes internes en différant dans le temps le stade de gélification de la résine puis la finalisation de la polymérisation de celle-ci.

Deux cycles de température sont expérimentés : [15mn à 120°C+ 2h à 150°C] ou [1h à 80°C+ 2h à 150°C]. Les résultats sont représentés sur la Figure 37 pour les pièces réalisées sur une plaque de moulage en composite carbone/époxy.

Dans le cas d'un moulage sur la plaque composite, les gauchissements après dé-moulage sont équivalents, bien que les gauchissements des pièces avec leurs équi-

pements d'infusion diffèrent distinctement. D'un cycle à l'autre, l'évolution du retrait et l'évolution de l'allongement thermique varient différemment. L'équivalence des gauchissements de pièces démoulées pourrait s'expliquer soit par le fait que les variations de ces paramètres n'influent pas de façon significative sur le niveau de contraintes transmises, soit par le fait que les variations d'un cycle par rapport à l'autre tendent à se compenser.

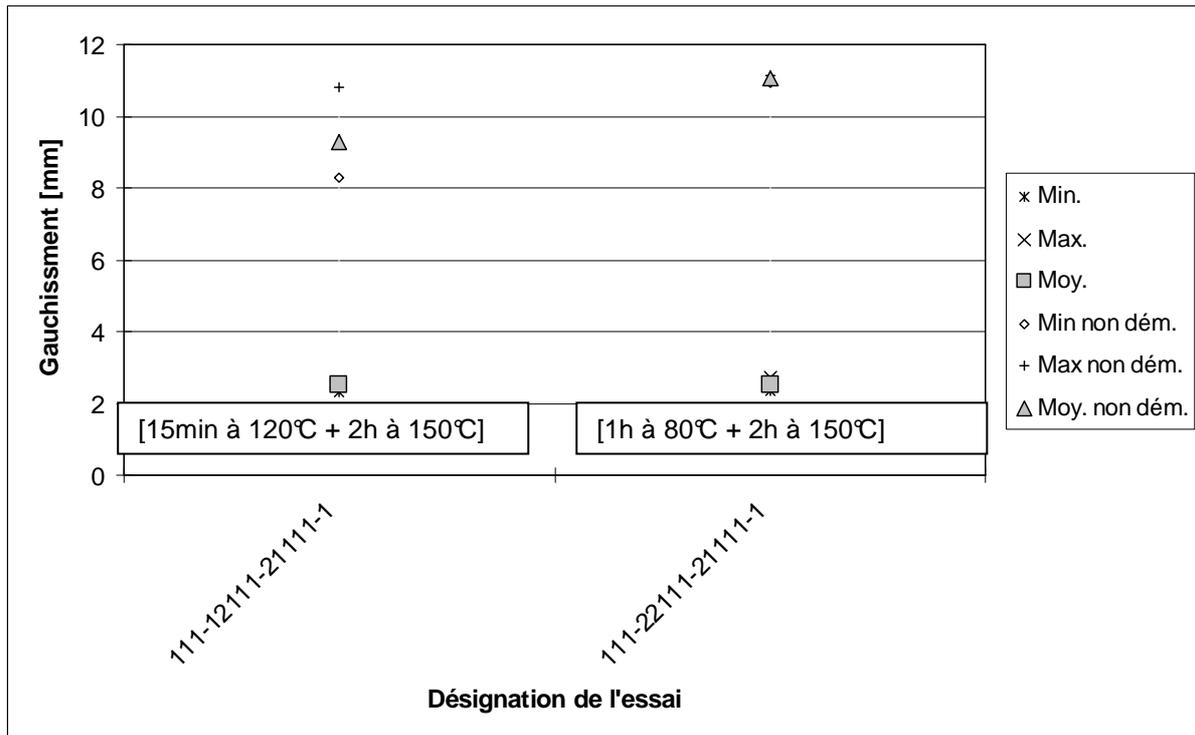


Figure 37: Comparaison des gauchissements résultant de deux cycles bi-paliers distincts

Les résultats ci-dessus sont comparés aux résultats de pièces réalisées avec ces cycles sur une plaque de moulage en aluminium sur la Figure 38. Les pièces réalisées sur une plaque de moulage en aluminium présentent une forte dépendance au cycle de cuisson. Le gauchissement des pièces diminue pour une hauteur de palier de maintien croissante. La différence dans l'amplitude de gauchissement pour des pièces réalisées sur ces deux matériaux d'outillage est imputée au mécanisme de déformation issue de l'interaction pièce-outillage. Ce mécanisme induit un transfert de contraintes vers la pièce coté outillage. Les contraintes ainsi transmises tendent à réduire l'effet du mécanisme de déformation induit par les équipements d'infusion.

L'amplitude de gauchissement plus faible des pièces réalisées sur plaques de moulage aluminium trahit la présence de contraintes résiduelles supplémentaires.

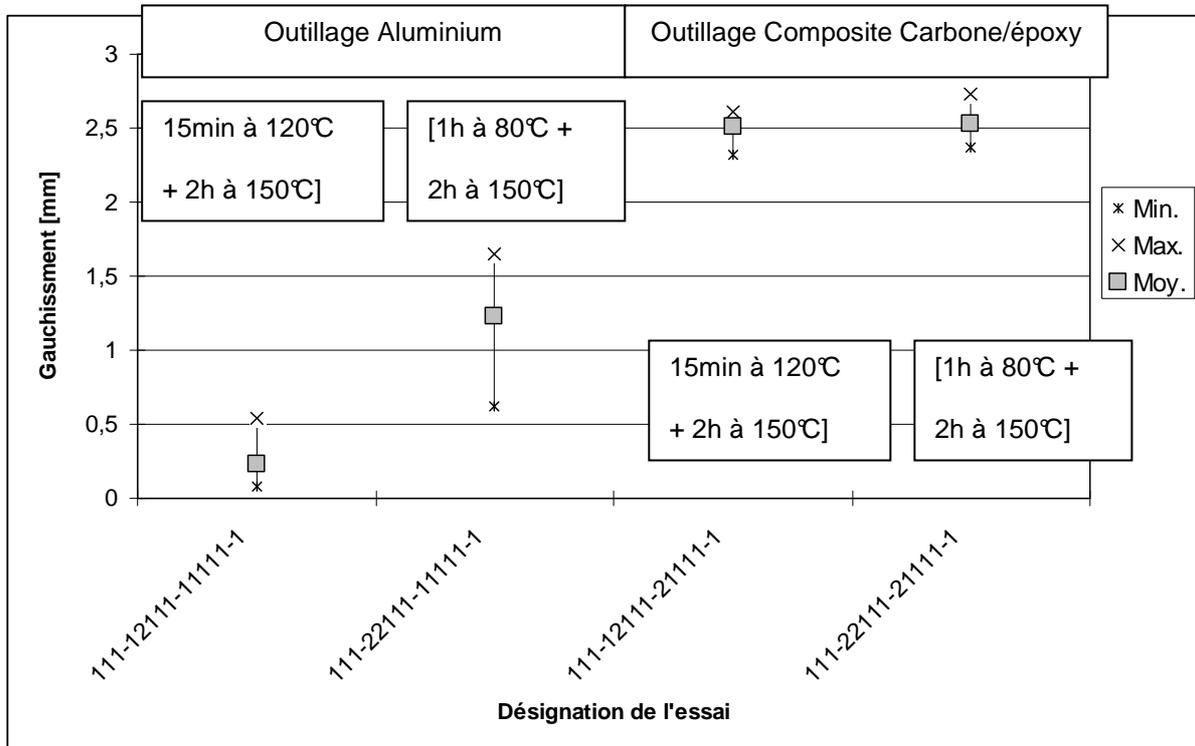


Figure 38: Comparaison des gauchissements en fonction du couple cycle de polymérisation-matériaux d'outillage

→ En infusion de résine, un moulage de pièce sur outillage composite carbone-époxy engendre une amplitude de déformation supérieure à celle obtenue par un moulage sur plaque de moulage aluminium.

III.3 Paramètres ressources

III.3.1 Equipements d'infusion

III.3.1.1 Epaisseur de média

Afin de mieux comprendre les relations entre les équipements d'infusion et la pièce, trois séries d'essais sont réalisés avec différentes épaisseurs d'équipements d'infusion. Le premier est équipé seulement d'un tissu d'arrachage. L'imprégnation

dans ce cas est donc frontale. Les deux suivants son respectivement réalisés avec un et deux médias de distribution. Il en ressort que le gauchissement de la pièce croît avec l'augmentation d'épaisseur des équipements d'infusion.

Il est à remarquer que l'amplitude de gauchissement de la pièce représente près de 1.5mm pour une épaisseur d'équipement d'infusion d'environ 0.1 mm et seulement 3mm pour une épaisseur d'équipement d'infusion d'environ 1.1mm. En effet, bien que l'amplitude de gauchissement avec les équipements croissent linéairement avec l'épaisseur de ceux-ci, l'amplitude de gauchissement des pièces démoulées tend à croître de manière asymptotique avec l'épaisseur des équipements d'infusion (Cf. Figure 40). Le ratio des gauchissements suit, quant à lui, une loi puissance $\omega = a \cdot e_{\text{média}}^{-b}$.

→ L'allure de la courbe de gauchissement en fonction de l'épaisseur des équipements d'infusion laisse penser que les contraintes sont concentrées à l'interface pièce/équipements d'infusion.

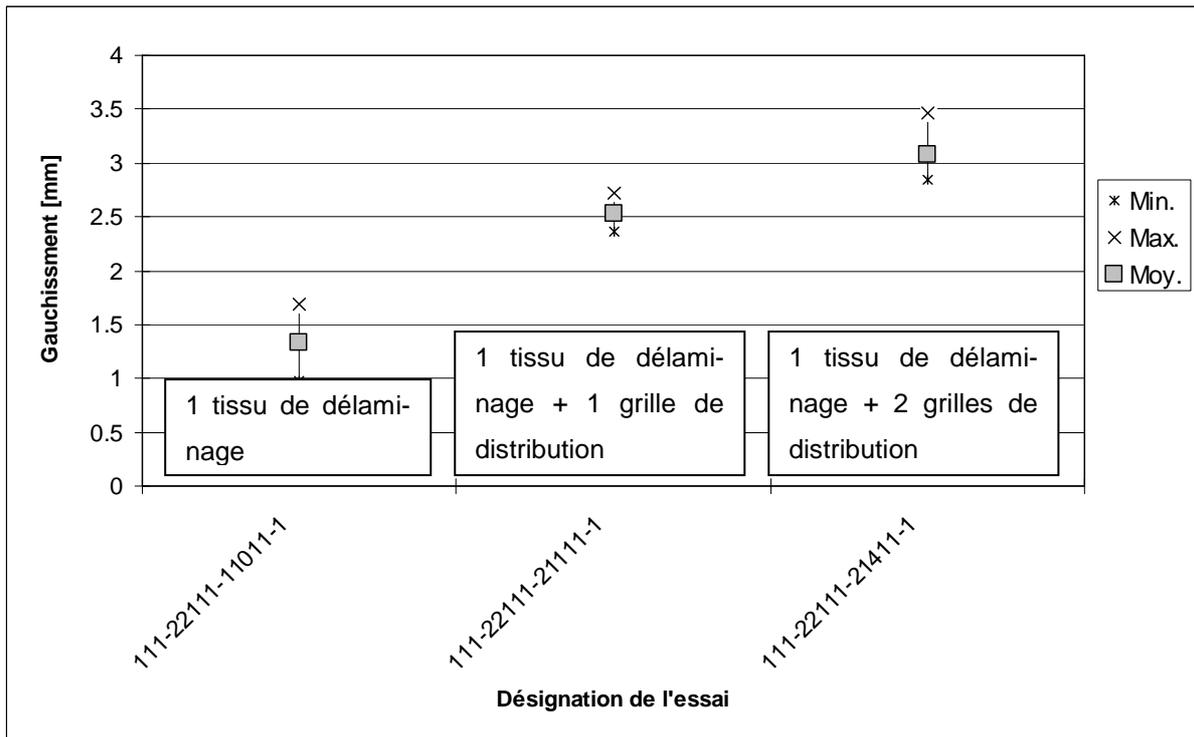


Figure 39: Influence de l'épaisseur des équipements d'infusion

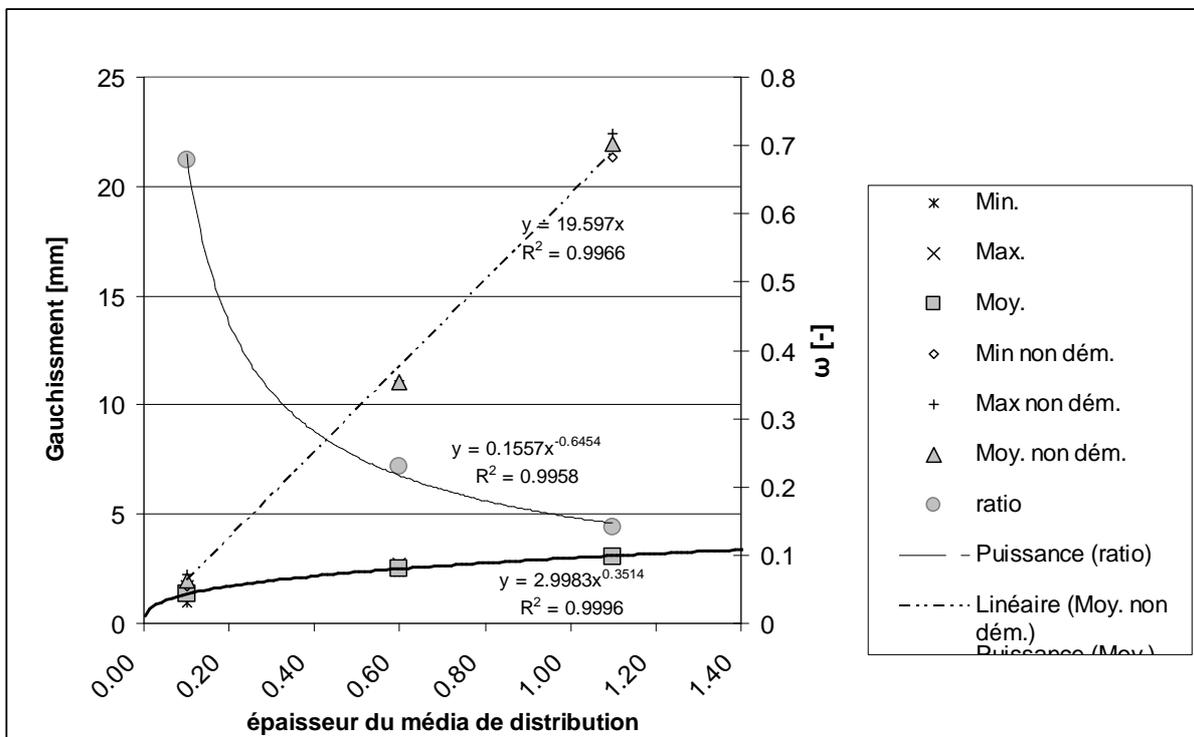


Figure 40: Ratio en fonction de l'épaisseur des équipements d'infusion

III.3.1.2 Type de tissu d'arrachage

Le tissu de délaminage doit remplir plusieurs fonctions. Sa fonction principale est de désolidariser après polymérisation et refroidissement les équipements d'infusion de la pièce à réaliser. D'autres fonctions complémentaires s'ajoutent à celle-ci comme par exemple l'aspect de surface laissé sur la pièce. Les trois tissus de délaminage que nous avons choisi d'expérimenter vont d'un tissage assez grossier jusqu'à un produit extrêmement fin permettant la mise en peinture du panneau en minimisant les retouches.

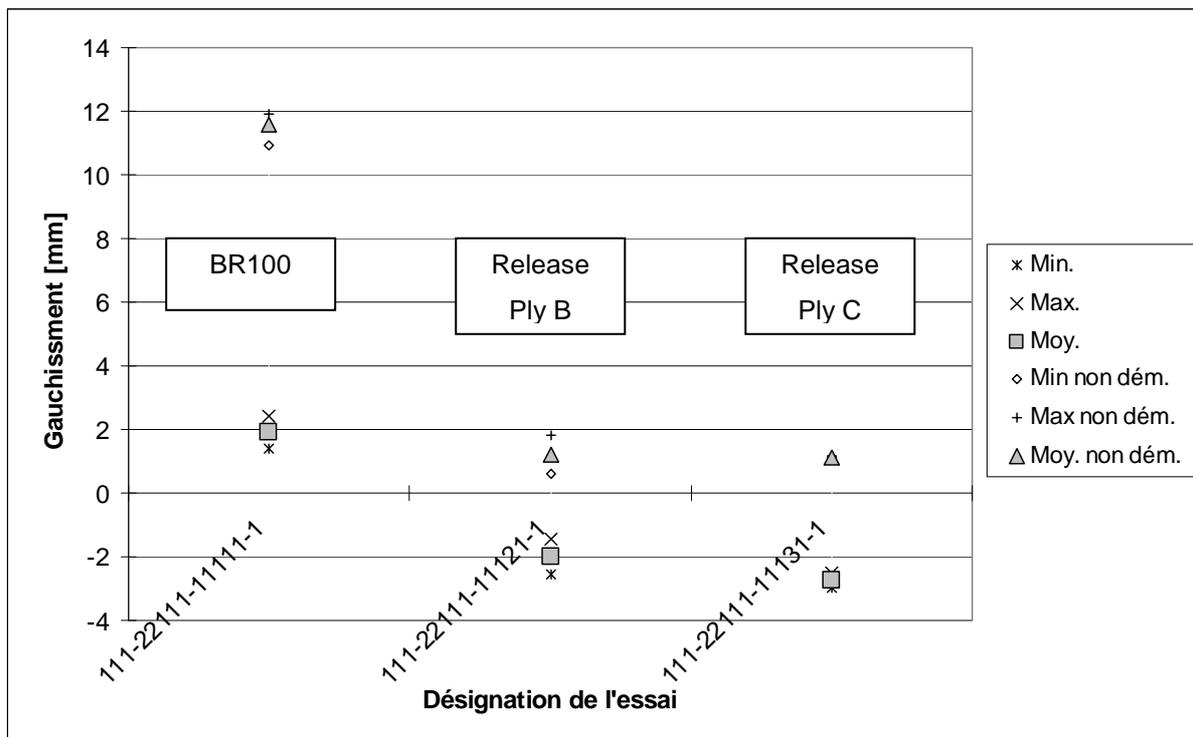


Figure 41: Gauchissements en fonction du type de tissu de délaminage

Les résultats mesurés (Cf. Figure 41) montrent une influence importante du type de tissu de délaminage utilisé. Malgré le fait que ces séries d'essais disposent du même média de distribution, les amplitudes de gauchissement avec équipements d'infusion varient fortement. Les deux tissus de délaminage « Release Ply B » et « Release Ply C » et présentent un gauchissement avec les équipements (c'est-à-dire non démoulé) extrêmement faible comparé aux essais de référence avec tissu de délaminage de « Aerovac BR100 ». Un glissement a lieu au refroidissement entre le média de

distribution et la pièce composite au travers de ces tissus d'arrachage. Le transfert de contraintes issue de l'interaction équipement d'infusion-pièce avec ces types de produit est fortement réduit. L'amplitude de gauchissement mesurée avec ces produits résulte de l'interaction pièce-outillage ainsi que du gradient de TVF dans l'épaisseur. La contribution du mécanisme de déformation issue de l'interaction équipement d'infusion-pièce est fortement réduite par l'utilisation des tissus d'arrachage « Release Ply B » et « Release Ply C ».

→ Le type de tissu d'arrachage joue un rôle prépondérant sur le niveau de contraintes transmis par le média de distribution

III.3.1.3 Type de média

Les médias de distribution sont des éléments essentiels dans la mise en œuvre par procédé d'infusion de résine. Leur fonction principale est de drainer la résine afin d'imprégner le renfort fibreux par un front dit transverse. Deux produits sont expérimentés car ils présentent de nombreuses différences, à commencer par leur processus de fabrication respectifs (Cf. II.4.4.2). Leurs influences sur les mécanismes de déformations sont caractérisées expérimentalement. Les essais sont réalisés avec le tissu d'arrachage de type 1, celui qui entrave peu un transfert de contraintes équipements d'infusion-pièce.

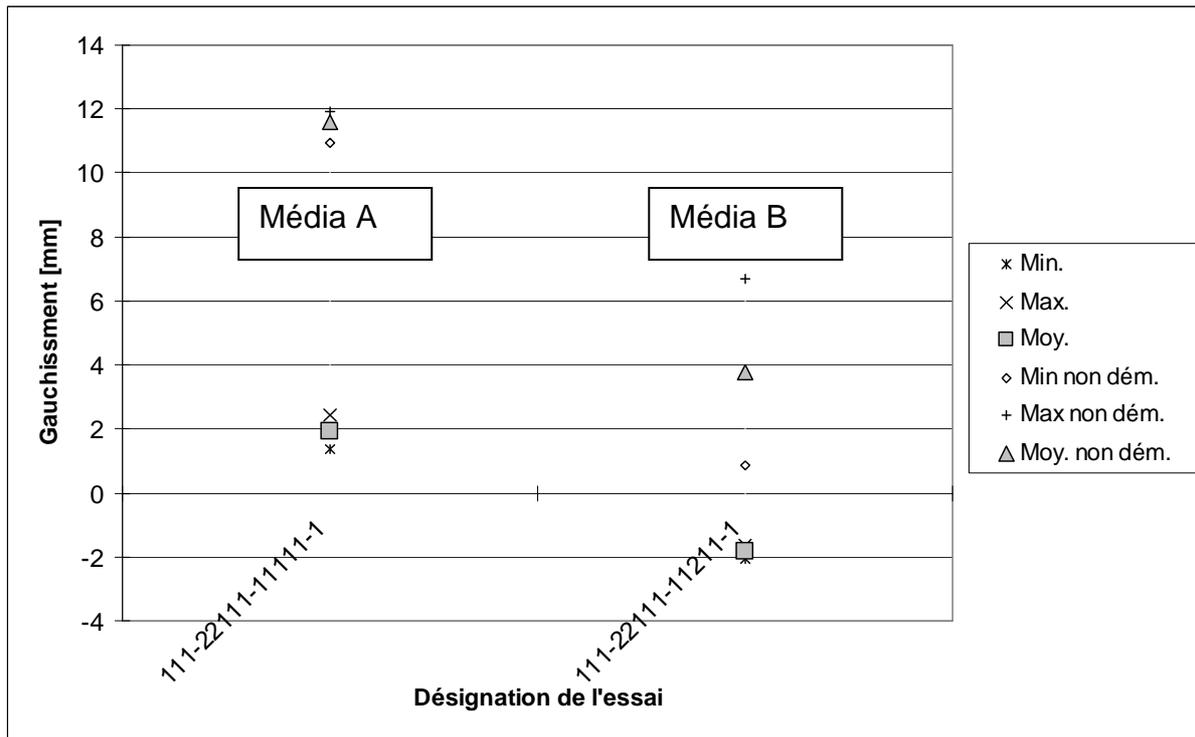


Figure 42: Influence du type de média de distribution

Il en résulte (Cf. Figure 42) une forte dépendance du type de média de distribution au vue de l'amplitude de gauchissement mesuré. Les pièces non-démoulées réalisées avec le média de distribution B présentent une amplitude de gauchissement fortement inférieure (environ -60%) par rapport aux pièces réalisées avec le média de distribution A. Le gauchissement de pièces démoulées suit ce même schéma, avec un gauchissement concave de la pièce par rapport à l'outillage. Dans le cas de l'utilisation d'un média de distribution de type 2, la contribution du mécanisme de déformation issue de l'interaction équipements d'infusion-pièce est fortement réduite. Le sens du gauchissement indique que les mécanismes de déformations dus à un gradient de TVF dans l'épaisseur à l'interaction pièce-outillage dominant.

Le processus de fabrication des ces deux types de médias est mis en cause. Les médias tissés garantissent une continuité de la résine dans le plan de celle-ci. Dans le cas d'un média extrudé, la résine en contact avec la pièce est emprisonnée dans la structure du média. On peut supposer que les changements volumiques dus aux aspects thermiques ou physico-chimiques soient localisés à l'échelle de ces mailles.

→ L'interaction équipements d'infusion-pièce dépend fortement du type de média utilisé.

III.3.2 Outillage de moulage

III.3.2.1 Matériaux d'outillage

Une idée reçue, déjà contredite par les travaux de [20], consiste à choisir un matériau d'outillage dont les dilatations sont au plus proche de la pièce à réaliser afin de minimiser les déformations induites par le procédé. Afin de caractériser l'influence des matériaux d'outillage sur les déformations induites par le procédé, diverses séries d'essai sont réalisées sur des plaques de moulage composite carbone-époxy et aluminium. Afin de mieux comprendre les phénomènes en présence, ces essais sont réalisés pour chaque matériau d'outillage avec trois cinétiques de montée en température (0.5, 2 et 8°C/mn) pour un cycle de 1h à 80° C puis 2h à 150°C. Les gauchissements des pièces résultants de ces essais sont représentés sur la Figure 43. On remarque que les amplitudes de gauchissement obtenues avec des matériaux d'outillage composite sont systématiquement supérieures à celles obtenues sur des outillages de moulage aluminium pour des cinétiques de montée en température identiques. L'écart entre ces deux gauchissements est imputable au mécanisme de déformation issu de l'interaction pièce-outillage. La contribution due à ce mécanisme tend à décroître avec l'augmentation de la cinétique de chauffe (environ 28% à 0.5°C/min et environ 18% à 8°C/min).

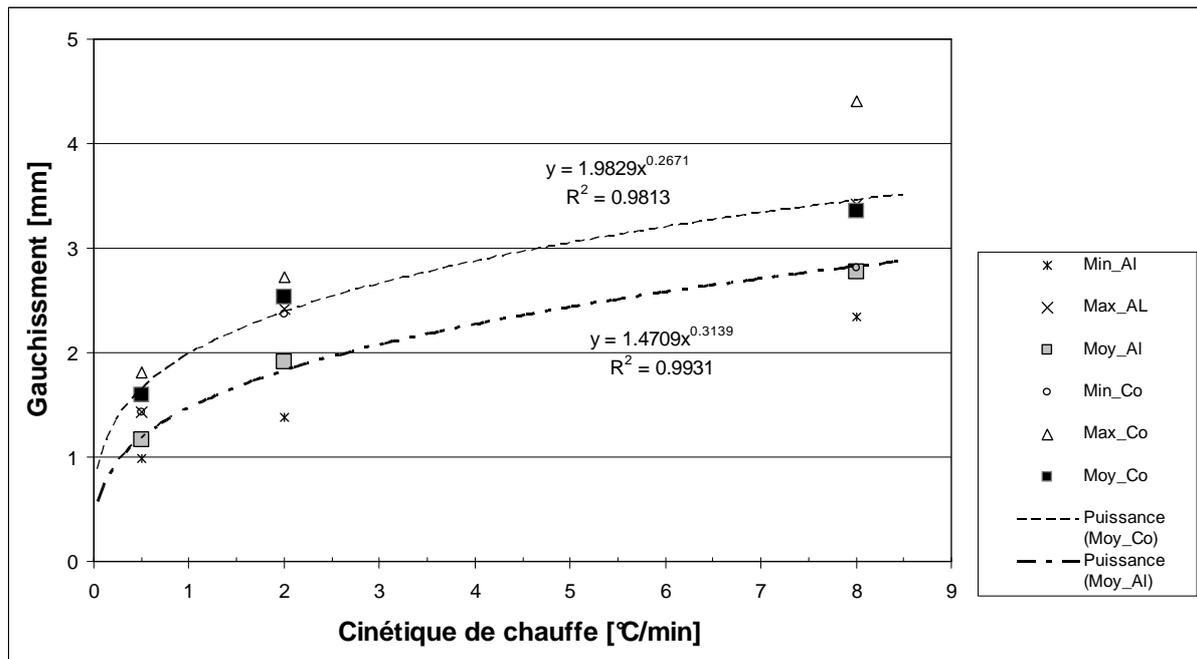


Figure 43: Gauchissements en fonction du matériau d'outillage et de la cinétique de montée en température

III.3.2.2 Agents de démoulage

Les agents de démoulage se présentent sous forme de deux grands groupes : les produits liquides et les produits solides, sous forme de film par exemple. L'influence de ces produits est évaluée expérimentalement. On s'attend à une influence sur le mécanisme de déformation issu de l'interaction pièce-outillage. Afin de caractériser distinctement cette influence, les essais sont réalisés en minimisant le mécanisme de déformation issu de l'interaction équipements d'infusion-pièce. L'emploi d'un film ETFE permet de réduire fortement l'amplitude de gauchissement résultant. Au vue de l'absence d'adhérence manifeste de ce produit sur la pièce, cela laisse donc supposer que son emploi, combiné à celui d'un tissu d'arrachage de même nature permet de supprimer, ou tout du moins de minimiser, les déformations dues aux interactions équipements d'infusion-pièce et pièce-outillage.

La Figure 44 présente l'influence de l'agent de démoulage sur l'amplitude de gauchissement. L'utilisation d'un film démoulant ETFE permet de réduire de près de 40% le gauchissement total des pièces. Cette réduction est imputée à la minimisation/suppression de l'interaction pièce-outillage par l'emploi d'un film démoulant. Le

gauchissement résultant apparaît donc comme étant en majorité le résultat du gradient de TVF dans l'épaisseur.

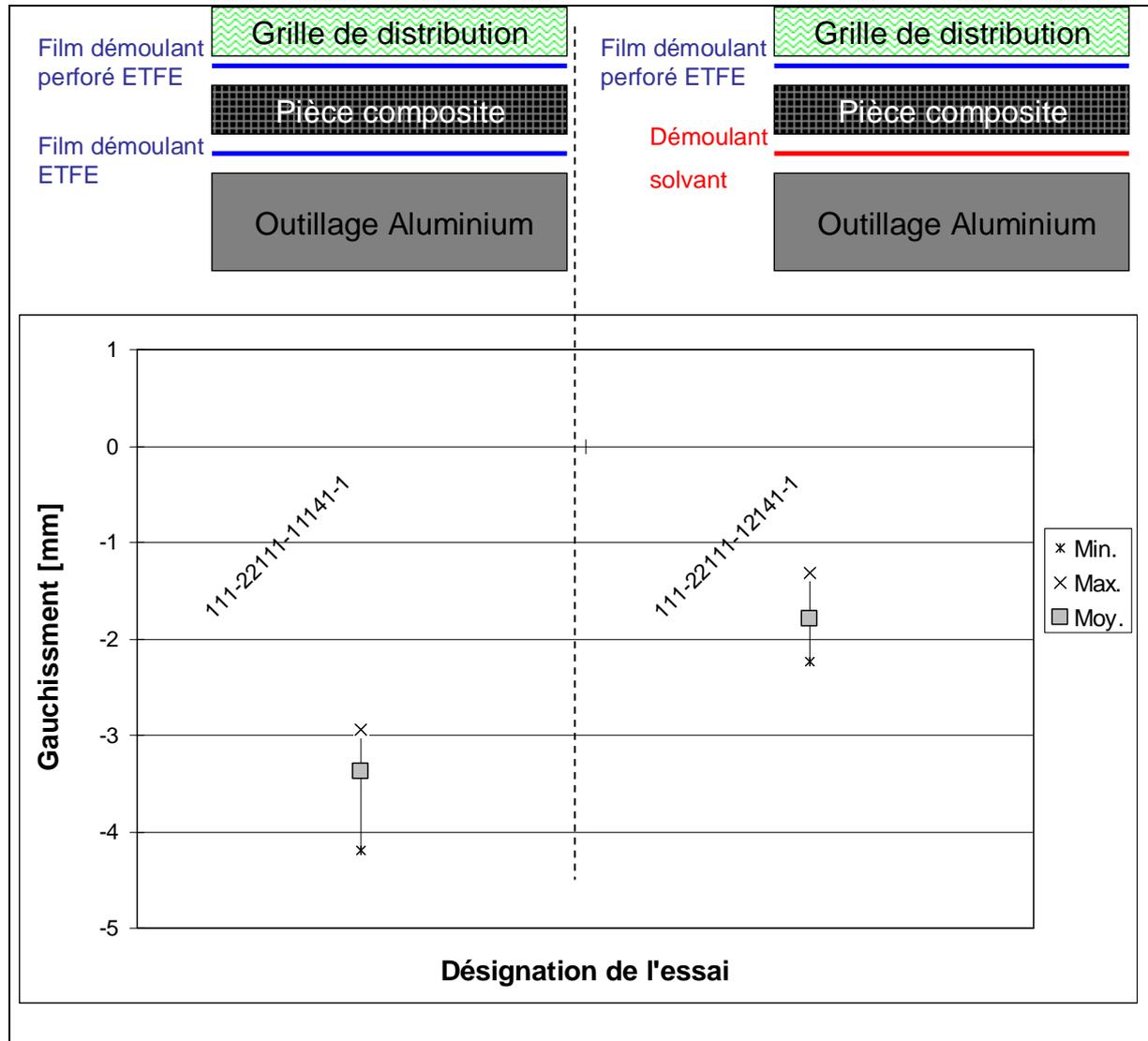


Figure 44: Influence de l'agent de démoulage de l'outillage

→ Le retrait de l'influence des interactions pièce-outillage et pièce-équipements d'infusion ne permet pas d'obtenir des plaques planes. Une dissymétrie, par exemple de taux volumique de fibres, entraîne une déformation résiduelle.

III.4 Paramètres produit

III.4.1 Géométrie de la pièce

La géométrie de la pièce est un facteur à prendre en compte tant la diversité des pièces à réaliser est riche. A l'instar de ce qui a été caractérisé pour le mécanisme de déformation du à l'interaction pièce-outillage, les déformations issues de l'interaction pièce-équipements d'infusion sont fortement dépendantes de la géométrie de la pièce (Cf. Figure 45 et Figure 46).

Il apparaît que les amplitudes de déformation de la pièce démoulée et non démoulée croissent en suivant une fonction puissance avec la longueur de la pièce. De même ces amplitudes décroissent avec l'épaisseur en suivant une loi puissance.

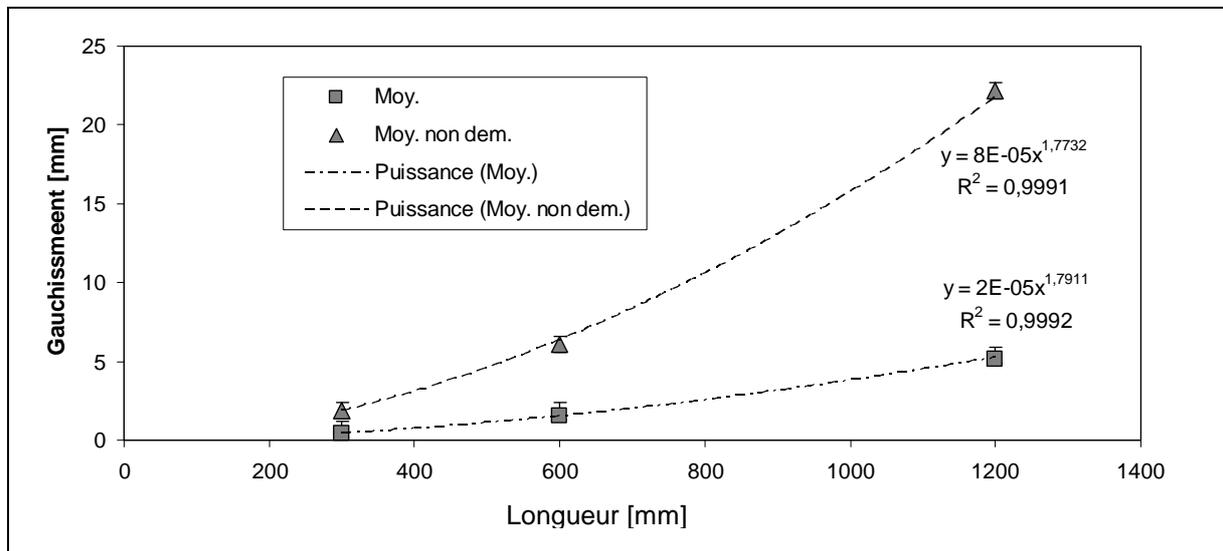


Figure 45: Influence de la longueur de la pièce sur le gauchissement

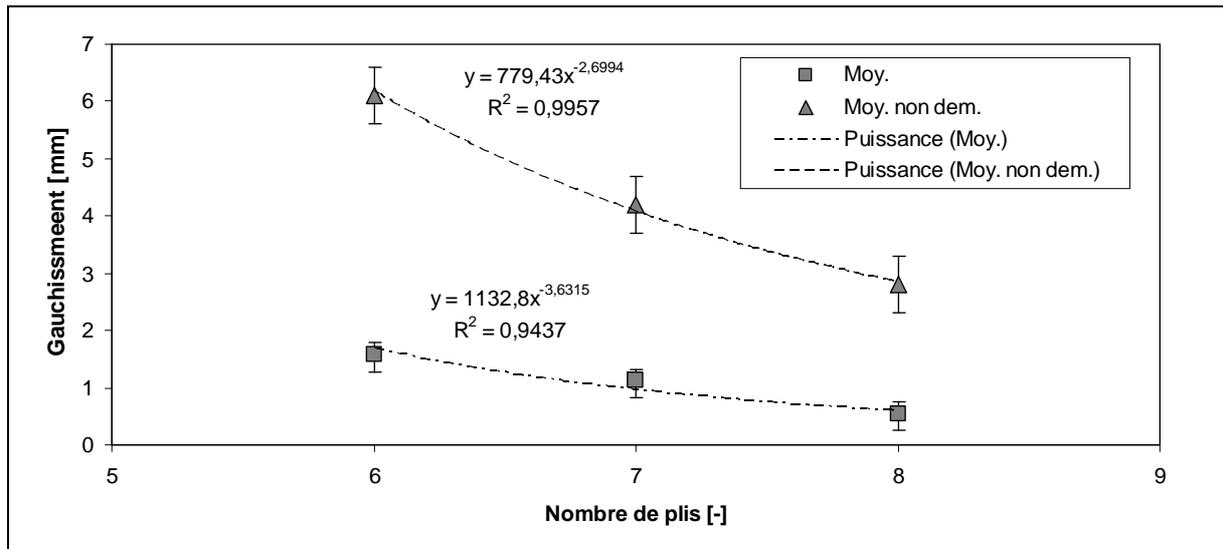


Figure 46: Influence de l'épaisseur des pièces sur le gauchissement

III.4.2 Fonction

La mise en œuvre de matériaux composites rend possible l'intégration de fonctions. Ces fonctions sont présentes à différentes échelles. Nous nous intéressons dans le cadre de cette étude aux tissus mécaniques fonctionnalisants. Ces tissus sont positionnés directement sur la peau extérieure de la pièce c'est-à-dire dans notre cas en contact avec l'outillage. La Figure 47 montre la déformation obtenue avec un tissu extrudé en cuivre comparé à une pièce sans tissu métallique. Comme attendu, l'influence de l'ajout d'un tissu métallique sur une pièce composite engendre après refroidissement des déformations non négligeables.

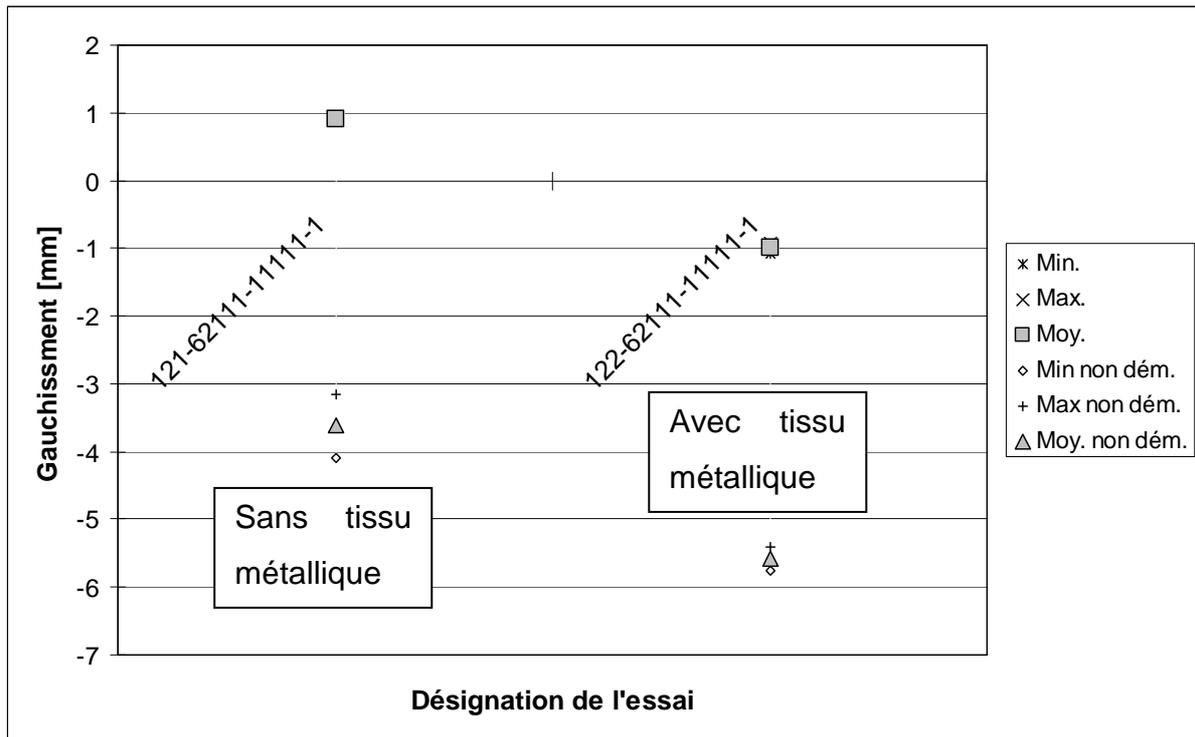


Figure 47: Influence d'un tissu métallique fonctionnalisant

III.5 Bilan

Le tableau ci-dessous synthétise l'influence des divers paramètres expérimentaux sur les déformations induites par l'interaction pièce-équipement d'infusion. Les paramètres liés aux ressources sont particulièrement influents. En effet, ce sont eux qui définissent l'ampleur de la contrainte ainsi que le taux de contraintes transmis via les propriétés d'interface.

Tableau 5: Interaction équipement d'infusion-pièce: bilan des facteurs influents

| Produit | |
|------------------------------------|-------|
| Longueur | Forte |
| Epaisseur | Forte |
| Tissu métallique fonctionnalisant | Forte |
| Procédé | |
| Cinétique de montée en température | Moyen |

| | |
|----------------------------------|--------|
| Cinétique de refroidissement | Faible |
| Hauteur des paliers de maintiens | Faible |
| Type de cycle | Moyen |
| Ressources | |
| Média de distribution | Fort |
| Tissu d'arrachage | Fort |

Cette phase expérimentale a permis de mettre en lumière un mécanisme de déformation propre au procédé d'infusion de résine : les équipements d'infusion induisent au cours de la mise en œuvre un transfert de contraintes vers la pièce. Ce mécanisme de déformation apparaît comme étant dominant par rapport à ceux classiquement rencontrés dans les procédés preimprégné-autoclave. Les méthodes de prédictions développées pour les procédés prepreg-autoclave ne peuvent être transposées sans la prise en compte des interactions pièce-équipement d'infusion.

Afin d'améliorer la compréhension du mécanisme, l'influence de paramètres produits, procédé et ressources a été évaluée expérimentalement. Cette base expérimentale doit permettre le développement d'un modèle de prédiction des déformations issues de ce mécanisme.