
Analyse expérimentale des déformations de type renfermement d'angle (ou « spring-in »)

V.1 Etat de l'art

V.1.1 Renferment d'angle induit par l'anisotropie des propriétés thermo physique

V.1.1.1 Principe

Les matériaux composites présentent l'avantage certain de présenter une forte anisotropie de leurs propriétés mécaniques. En effet, il est possible de disposer les fibres dans une pièce en fonction des cas de charge. Les matériaux composites ont particulièrement trouvé place sur des typologies de pièces de type coque, c'est-à-dire des pièces dont l'épaisseur est très faible par rapport à la surface (ratio supérieur à 10). Pour ces applications, les fibres se présentent d'une manière générale sous forme de tissus. La pièce est composée d'un empilement de couches de fibres. Dans l'épaisseur de la pièce, la cohésion du produit est uniquement réalisée par la résine, contrairement aux fibres dans le plan où la cohésion est obtenue par un assemblage intime entre les fibres et la résine.

Cette anisotropie des propriétés dans le plan et dans l'épaisseur est responsable de déformations significatives de pièces de forme [35] et [36]. En effet, lors de la mise en œuvre de pièces composites, la température ainsi que le degré de polymérisation évoluent. Il en résulte une évolution différentielle des contraintes générées dans le plan et dans l'épaisseur de la pièce.

Dans le cas de pièces de forme présentant un angle, telle qu'une pièce en L, l'angle réalisé de la pièce après démoulage tend à être plus faible que celui de la pièce théorique. La différence entre l'angle théorique et l'angle réalisé est appelé angle de fermeture ou « spring-in angle ».

Cet angle de fermeture résulte de deux phénomènes physiques distincts, à savoir l'anisotropie des propriétés de dilatations thermiques ainsi que de retrait de polymérisation de pièces.

Plusieurs auteurs (Cf. [35] [36]) proposent des équations reliant l'angle de fermeture aux coefficients longitudinaux et transverses de dilatation et de retrait
(Cf.

Équation 35)

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= \Delta\theta_{CTE} + \Delta\theta_{CS} \\ &= \theta \cdot \left(\frac{(\alpha_l - \alpha_t) \cdot \Delta T}{1 + \alpha_t \cdot \Delta T} \right) + \theta \cdot \left(\frac{\phi_l - \phi_t}{1 + \phi_t} \right)\end{aligned}$$

Équation 35

Cette approche considère que le renfermement d'angle est un phénomène strictement intrinsèque, c'est-à-dire qu'il dépend uniquement des propriétés intrinsèques de la pièce. Celles-ci sont géométriques (angle) ou matériaux (coefficients de dilatation, de retrait)

V.1.2 Paramètres intrinsèques

V.1.2.1 Empilement

L'empilement des couches de fibres est un paramètre influent sur le mécanisme de renfermement d'angle. En effet, en fonction de l'orientation de chaque pli, l'anisotropie du matériau résultant est modifiée. La Figure 66 permet d'illustrer ces propos. L'angle de fermeture est mesuré expérimentalement en fonction de trois empilements simples 0°, 45° et 90°. On observe qu'avec une anisotropie décroissante, l'angle de fermeture se voit réduit, en accord avec le principe même du renfermement d'angle de pièces composites.

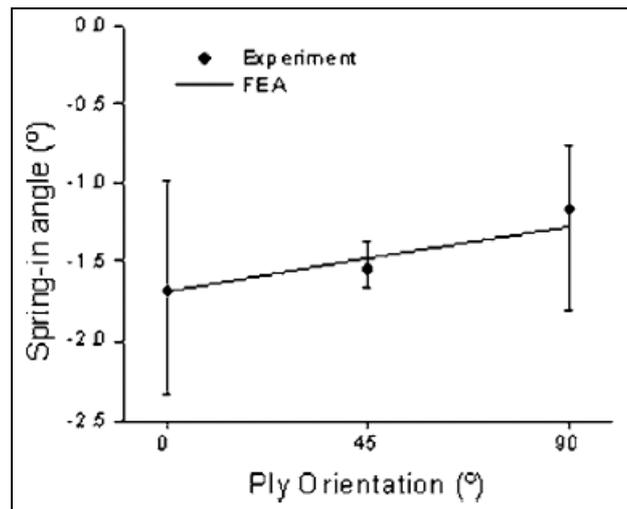


Figure 66 Comparaison expériences/simulations en fonction de l'orientation des fibres [37]

V.1.2.2 Gradient de TVF

Le mécanisme de déformation induit par un gradient de TVF décrit plus en détail au chapitre II.1.2.2 pour le cas des pièces planes affecte de la même manière les pièces en angle. Ainsi, une mauvaise répartition des fibres dans un rayon induit un gradient de propriétés du matériau dans l'épaisseur. Dans les cas les plus classiques (Cf. Figure 67), les fibres, de part les tensions en présence, tend à se concentrer vers le rayon intérieur. La contraction au refroidissement de la pièce ainsi que le retrait de polymérisation sont d'autant plus importants que l'on se rapproche du rayon extérieur. Ainsi, la pièce tend à s'ouvrir.

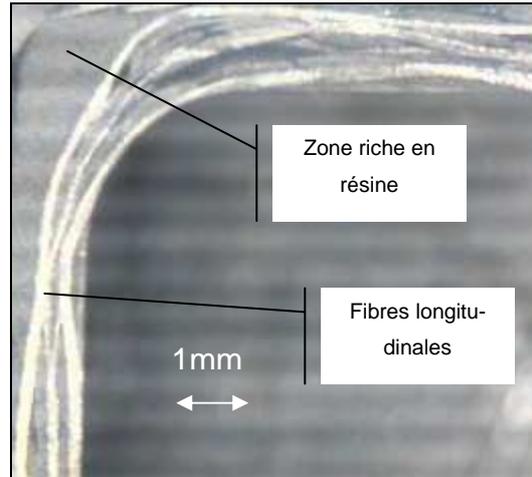


Figure 67 : Micrographie d'une pièce en angle présentant un gradient de TVF

V.1.2.3 Cas des produits composites sandwich

Les pièces composites sandwich, c'est-à-dire composées d'une âme et de deux peaux monolithiques de résines renforcées de fibres, sont également affectées par les phénomènes de renfermement d'angle. Le type d'âme utilisé joue un rôle non négligeable. La contribution de l'âme a été évaluée analytiquement par G. Fernlund [37] (Cf. Figure 68).

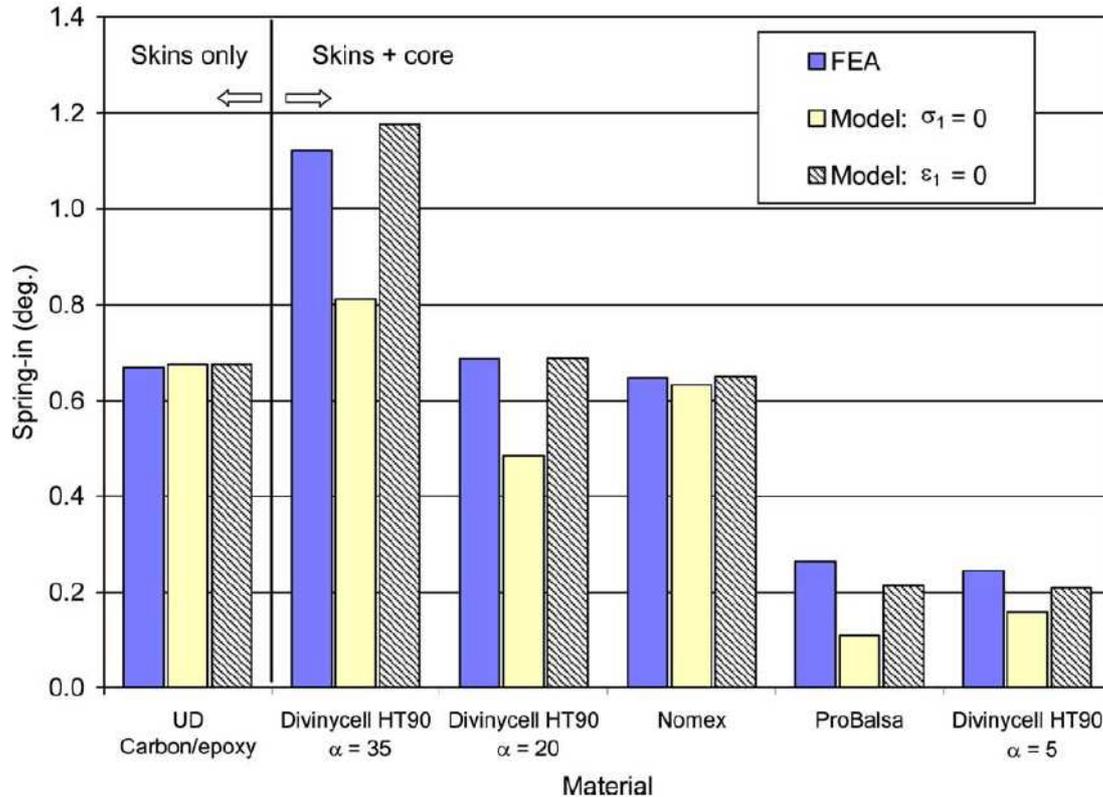


Figure 68 : Comparaison des angles de fermeture entre les prédictions FEM et ceux de modèles analytiques en fonction de matériaux d'âme [37]

V.1.3 Paramètres extrinsèques

V.1.3.1 Grandeur mesurée

La littérature est riche de publications sur le sujet du renfermement d'angle de pièces composites. C. Albert et G. Fernlund [38] ont mis en évidence l'influence de la méthode de mesure de l'angle de fermeture. En effet, les auteurs mettent en évidence que, malgré une amplitude de gauchissement des pannes de l'ordre de 0.2mm, le gauchissement contribue à hauteur de 0.48° sur l'angle de fermeture mesuré. L'auteur considère que l'angle de fermeture mesuré résulte de la somme de la composante liée au rayon de la pièce et celle liée aux gauchissements des pannes adjacentes (Cf. Figure 69)

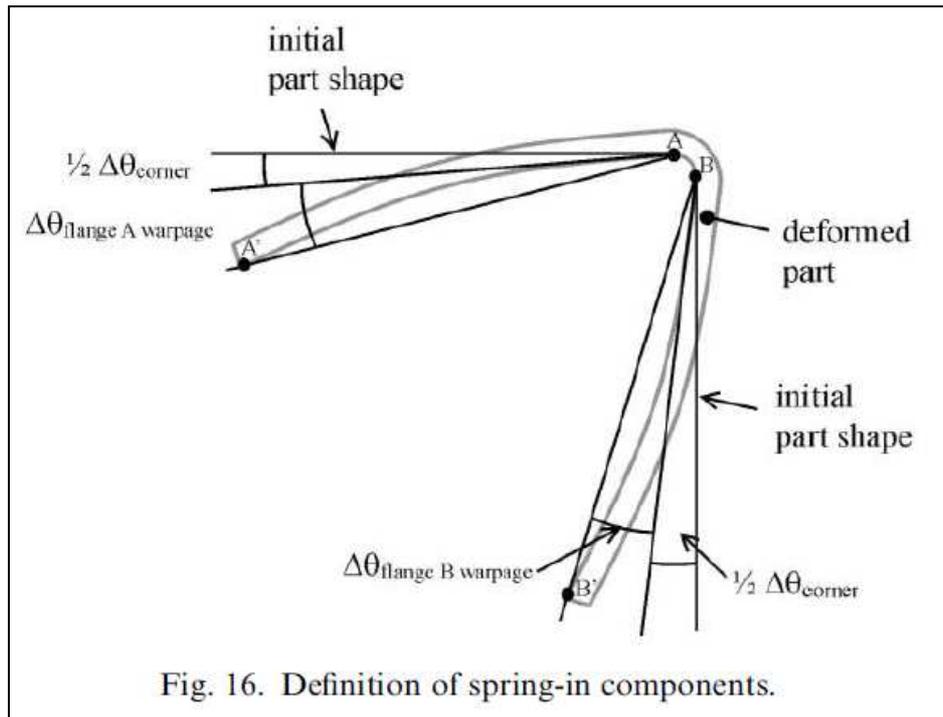


Figure 69 : Définition des composantes de l'angle de fermeture [38]

V.1.3.2 Influence de la géométrie

Le mécanisme de déformation est, par définition, intrinsèque. Ainsi, on attend une dépendance significative à des paramètres géométriques des pièces. C. Albert et G. Fernlund [37] ont caractérisé l'influence de l'épaisseur de la pièce sur les composantes de l'angle de fermeture. La composante issue du gauchissement des pannes présente une forte dépendance à l'épaisseur. Cette constatation va dans le même sens que les études réalisées sur le gauchissement de plaques planes (Cf. II.1.2.4). La composante de renfermement d'angle liée au rayon de la pièce tend, quant à elle, à être indépendante de l'épaisseur. Les auteurs montrent que cette composante peut être encadrée en utilisant l'équation décrivant la fermeture d'angle basée sur l'

Équation 35

Tableau 9 : Influence de l'épaisseur de l'échantillon

Part ID	Part shape	Lay-up	Flange length (mm)	Thickness (plies)	Part angle (°)	Tool material	Tool surface ^a	Cure cycle (holds)	$\Delta\theta_{total}$ (°)	Range ^b (°)	$\Delta\theta_{corner}$ (°)	$\Delta\theta_{warpage}$ (°)
TS2-1	C	[0] ₈	57	8	90	Aluminum	Release agent (3)	2	1.64	±0.02	0.85	0.79
TS-1	C	[0] ₁₆	57	16	90	Aluminum	Release agent (3)	2	1.11	±0.01	0.83	0.28
TS2-2	C	[0] ₁₆	57	16	90	Aluminum	Release agent (3)	2	1.20	±0.01	0.95	0.25
TS-2	C	[0] ₈	57	8	90	Aluminum	Release agent (3) + FEP	2	0.92	±0.02	0.78	0.14
TS-3	C	[0] ₁₆	57	16	90	Aluminum	Release agent (3) + FEP	2	0.79	±0.02	0.72	0.07
TS2-3	C	[0] ₁₆	57	16	90	Aluminum	Release agent (3) + FEP	2	0.90	±0.02	0.88	0.02
TS2-4	C	[0] ₈	57	8	90	Steel	Release agent (3)	2	1.63	±0.05	0.75	0.88
TS-4	C	[0] ₁₆	57	16	90	Steel	Release agent (3)	2	1.15	±0.02	0.77	0.38
TS2-5	C	[0] ₁₆	57	16	90	Steel	Release agent (3)	2	1.25	±0.02	0.88	0.37
TS-5	C	[0] ₈	57	8	90	Steel	Release agent (3) + FEP	2	0.84	±0.04	0.65	0.19
TS-6	C	[0] ₁₆	57	16	90	Steel	Release agent (3) + FEP	2	0.78	±0.05	0.60	0.18
TS2-6	C	[0] ₁₆	57	16	90	Steel	Release agent (3) + FEP	2	0.85	±0.02	0.81	0.04

^a The number within parenthesis denotes the number of coats of release agent applied. FEP denotes the use of a fluorinated ethylene propylene sheet.

^b The range shown represents 1/2 (maximum measured value—minimum measured value).

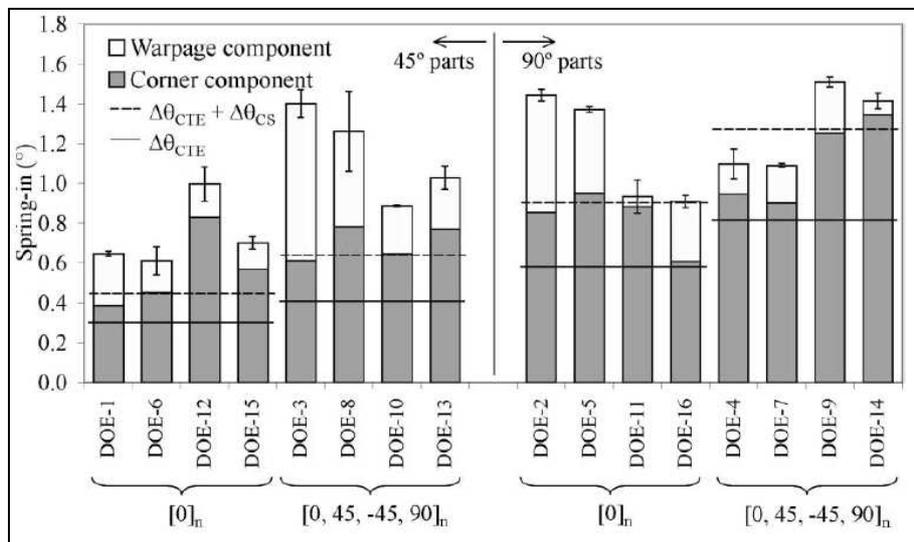


Figure 70 : angle de fermeture par composante et prédictions analytiques [36]

C. Albert et G. Fernlund [37] se sont également intéressés à la forme de la pièce. Ainsi, deux formes ont été réalisées : une en C et l'autre en L. Cette campagne d'essais permet d'évaluer la représentativité de pièces simples par rapport à des géométries plus évoluées.

Il apparaît que l'angle de fermeture est peu influencé par l'évolution de la géométrie (Cf. Figure 71). Il faut toutefois noter que ces résultats sont en contradiction avec l'étude [39] qui présente une dépendance forte (près de 30%) de l'angle de fermeture en fonction de l'évolution de cette géométrie.

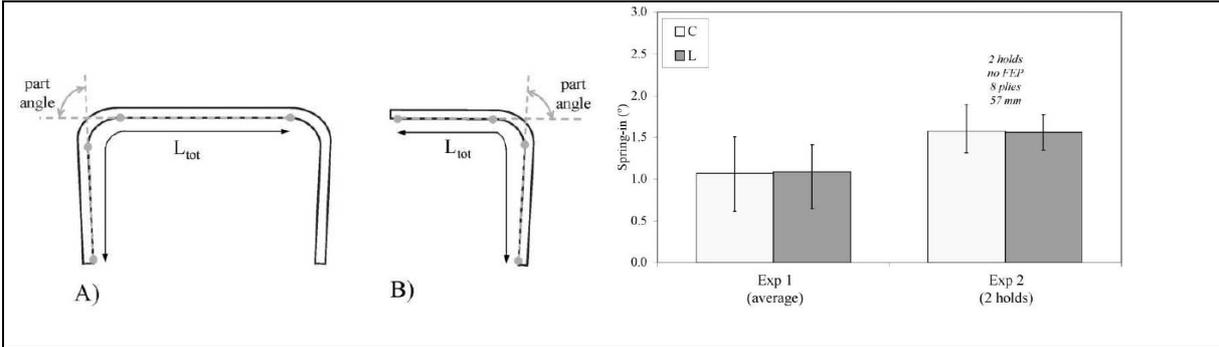


Figure 71 : Méthode de mesure de pièces en forme de C (A) et de L(B) et résultats expérimentaux [36]

V.2 Approche expérimentale

V.2.1 Objectifs

Cette étude expérimentale doit permettre d'identifier l'influence des paramètres produit-procédé-ressources sur le mécanisme de fermeture des angles.

V.2.2 Dispositif expérimental

V.2.2.1 Outillage

Un outillage de moulage par procédé d'infusion a été conçu et développé pour cette campagne d'essai. La conception générale est semblable à celle de l'outillage développé précédemment pour l'analyse expérimentale du gauchissement (Cf. II.2.1.2). L'outillage est thermiquement autonome. La chauffe est réalisée par un jeu de résistances électriques régulées en deux zones de chauffe.

Les résistances électriques sont positionnées au centre de l'outillage afin d'équilibrer les gradients de températures dans l'épaisseur de l'outillage (Cf. Figure 72). Ainsi, les déformations de l'outillage induites par les cycles de température sont négligées.

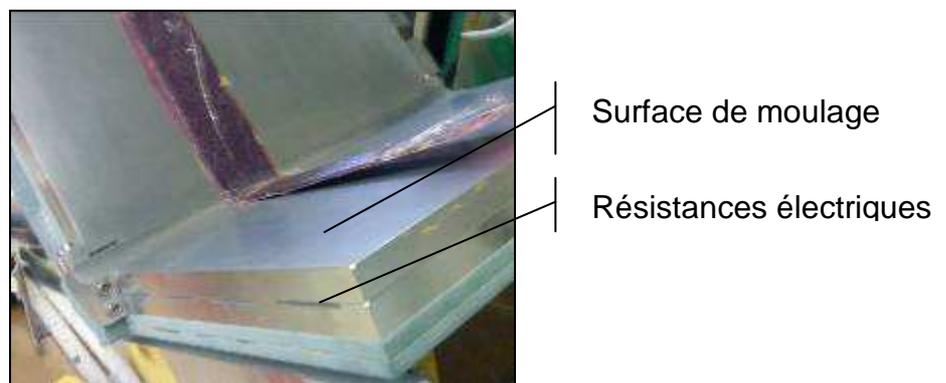


Figure 72: Outillage d'essai

L'outillage a été conçu de telle façon que différentes géométries de pièces puissent être réalisées. Dans le cadre de cette étude, deux rayons de raccordement seront analysés : 100mm et 20 mm (Cf. Figure 73).

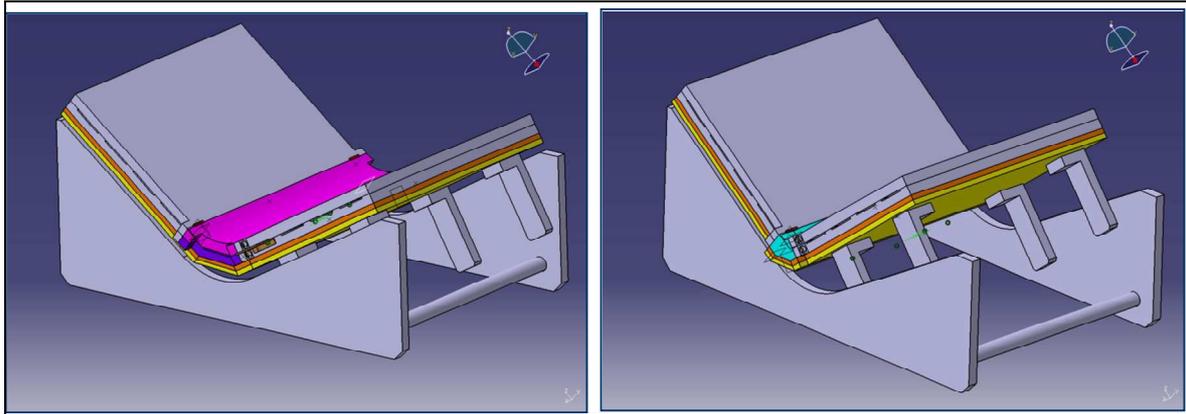


Figure 73: Conception d'un outillage d'infusion modulaire

V.2.2.2 Prise en compte de l'instabilité dimensionnelle sous charge thermique

Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéressons particulièrement aux outillages à faible coût initial et récurrent. Ainsi, l'aluminium a été choisi comme matériau d'outillage pour ses qualités thermiques (conductivité), ses coûts de mise en œuvre ainsi que sa durabilité.

L'Aluminium présente cependant un coefficient de dilatation thermique de près de $23.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. La variation géométrique de l'outillage soumis à un cycle thermique caractéristique (température max 150°C) ne peut être négligée. La prédiction du dimensionnel d'un corps soumis à des variations thermiques est bien établie dans le cas de conditions aux limites simples.

Dans le cas de notre outillage, seuls les éléments d'outillage de moulage sont thermiquement régulés. Le bâti est isolé de ces derniers au moyen de plaques isolantes. Afin de simplifier les conditions aux limites du problème, et en particulier les éventuelles contraintes aux liaisons éléments de moulage thermiquement régulés et le bâti « froid », un assemblage particulier a été conçu. Les liaisons sont telles, que les éléments de moulage sont considérés comme libres. Technologiquement, cela se traduit par des liaisons de 0 à 3 degrés de liberté, de telle façon qu'aucun moment ne peut être généré. L'angle de l'outillage varie librement sous l'action de la dilatation thermique.

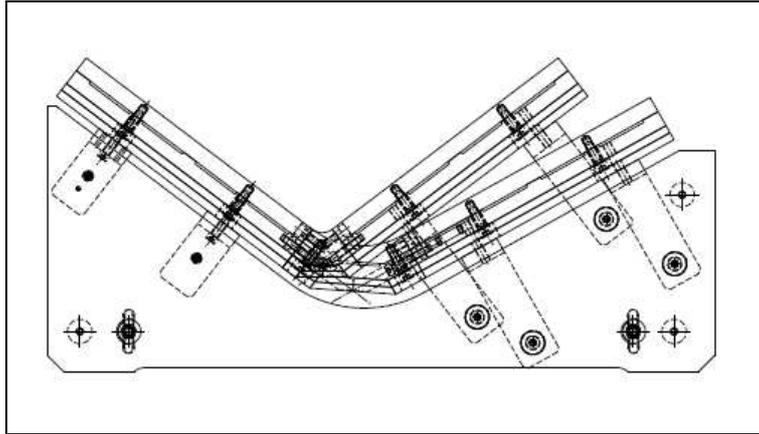


Figure 74 : Choix technologique pour la prise en compte des dilatations thermiques

V.2.2.3 Compactage du rayon

Dans le cas des procédés d'infusion, l'opération de préformage peut être particulièrement critique. En effet, le préformage est réalisé au moyen d'un contre-moule souple, traditionnellement une vessie ou bâche. Dans le cas de pièce en angle, le compactage au niveau du rayon de raccordement peut prendre un caractère aléatoire avec de faibles performances mécaniques.

Plusieurs configurations de préformage ont été évaluées expérimentalement [Cf. Figure 75]. En effet, afin d'être en mesure de négliger un gradient de TVF le long de la pièce, le compactage des fibres doit être homogène.

Les résultats expérimentaux (Cf. Figure 76) montrent que dans cette configuration, seul un compactage mécanique permet de garantir un TVF équivalent aux pannes de la pièce.



Figure 75: Variations de mise en œuvre pour le compactage du rayon de raccordement

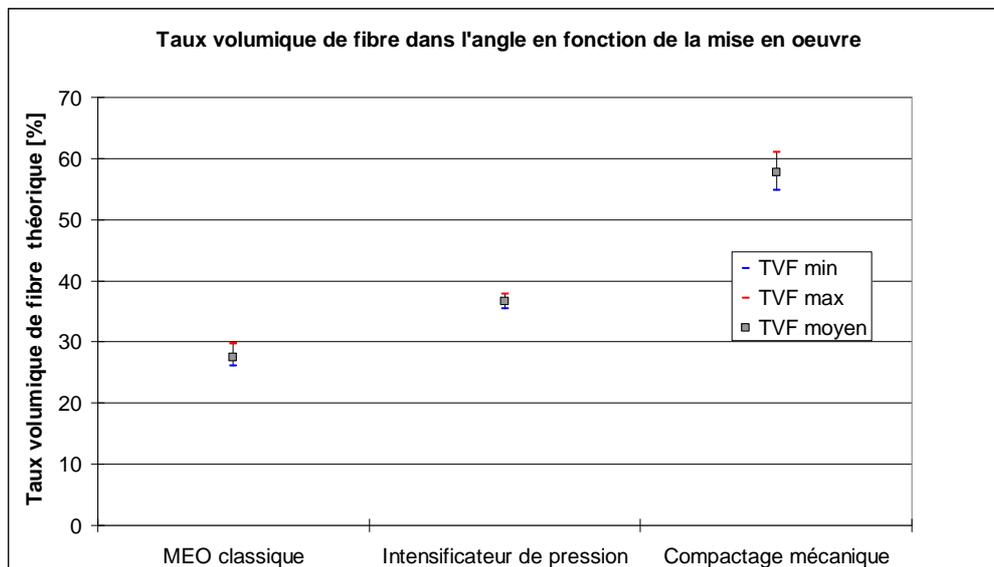


Figure 76: TVF dans le rayon en fonction de la mise en œuvre du compactage

V.2.2.4 Principe de mesure du renfermement d'angle

L'état de l'art montre les difficultés et les approximations de la mesure d'un angle de fermeture (Cf. V.1.3.1). Nous avons fait le choix pour des raisons de faisabilité techniques, de mesurer l'angle de fermeture à partir des panes de la pièce. Ces dernières sont elles-mêmes déformées. Elles subissent un gauchissement caractéristique tel qu'étudié dans les chapitres précédents (Cf. Figure 77).

L'angle mesuré est l'angle entre les plans moyens de chaque panne (Cf. Figure 78). Ainsi, cet angle résulte de deux composantes distinctes : la première, liée au méca-

nisme de renfermement d'angle, la seconde induite par le gauchissement des pan-

nes.

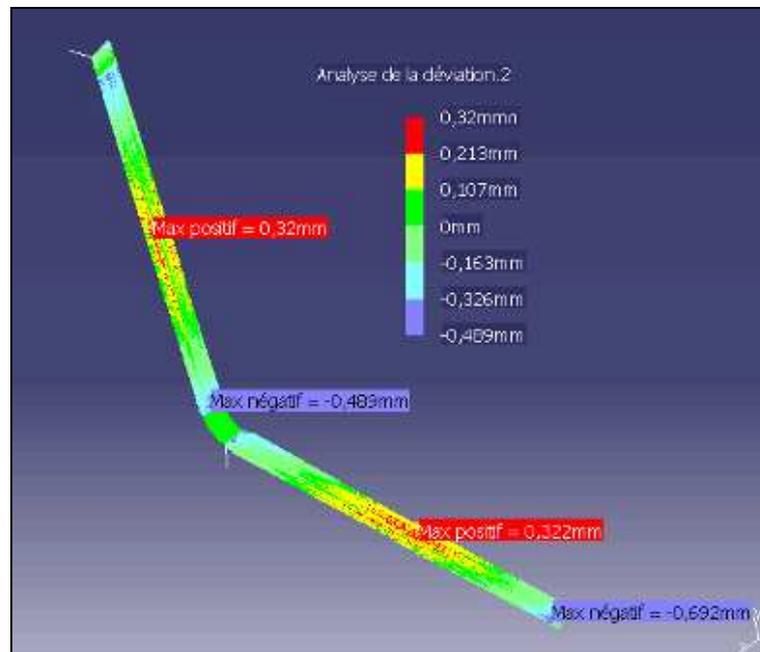


Figure 77: Déviation géométrique d'une pièce en angle par rapport au théorique

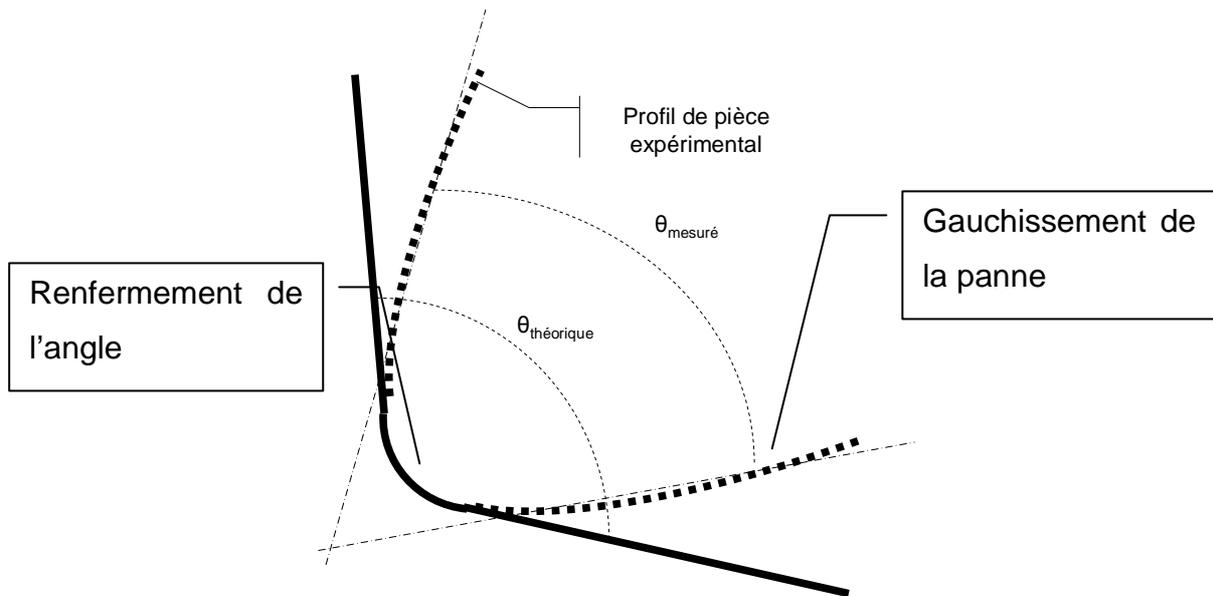


Figure 78: Définition de l'angle mesuré

La Figure 79 présente, pour une série de valeurs expérimentales, la décomposition selon la source : composante issue du mécanisme de fermeture d'angle ou composante issue du gauchissement des pannes (Cf.

Équation 36).

$$\theta_{mesuré} = 2 \cdot (\theta_{fermeture} + \theta_{gauchissement})$$

Équation 36

La composante de gauchissement $\theta_{gauchissement}$ est calculée à partir des équations déterminées à partir des résultats expérimentaux sur pièce plane (Cf.II.4). Ces équations sont du type polynomiales du second ordre. La composante de gauchissement peut être calculée comme la tangente de la fonction au point de jonction entre la panne et le rayon de la pièce (Cf.

Équation 37).

$$\theta_{\text{gauchissement}} = f'(x_a) = 2 \cdot a \cdot x_a + b$$

Équation 37

La Figure 79 présente la valeur d'angle de fermeture mesuré pour des pièces réalisées à différentes cinétiques de montée en température. Conformément aux attentes, cet angle croît avec une rampe de chauffe croissante. En effet, sur cette plage, le retrait de polymérisation de la résine croît avec la rampe de chauffe. Ceci permet d'expliquer un accroissement de l'anisotropie des propriétés de retrait dans le plan par rapport à celles dans l'épaisseur.

La composante issue du gauchissement est calculée à partir des résultats expérimentaux obtenus au chapitre II.4.2.1 , croît également avec l'augmentation de la cinétique de chauffe.

A partir de ces informations, il est possible de recalculer l'angle issu de la fermeture de l'angle de la pièce. Cette composante tend à décroître fortement avec une cinétique de chauffe croissante. Ceci est en contradiction avec les résultats attendus, puisque l'anisotropie des propriétés de retrait de polymérisation est renforcée avec une cinétique de chauffe croissante.

La méthode de calcul de la composante de gauchissement exprimé par [38] semble ne pas être transposable à nos travaux. La différence de rayon de raccordement des pièces étudiées pourrait l'expliquer. Afin de mettre en lumière l'influence réelle du gauchissement des pannes sur la fermeture de pièce en angle, d'autres investigations doivent être menées.

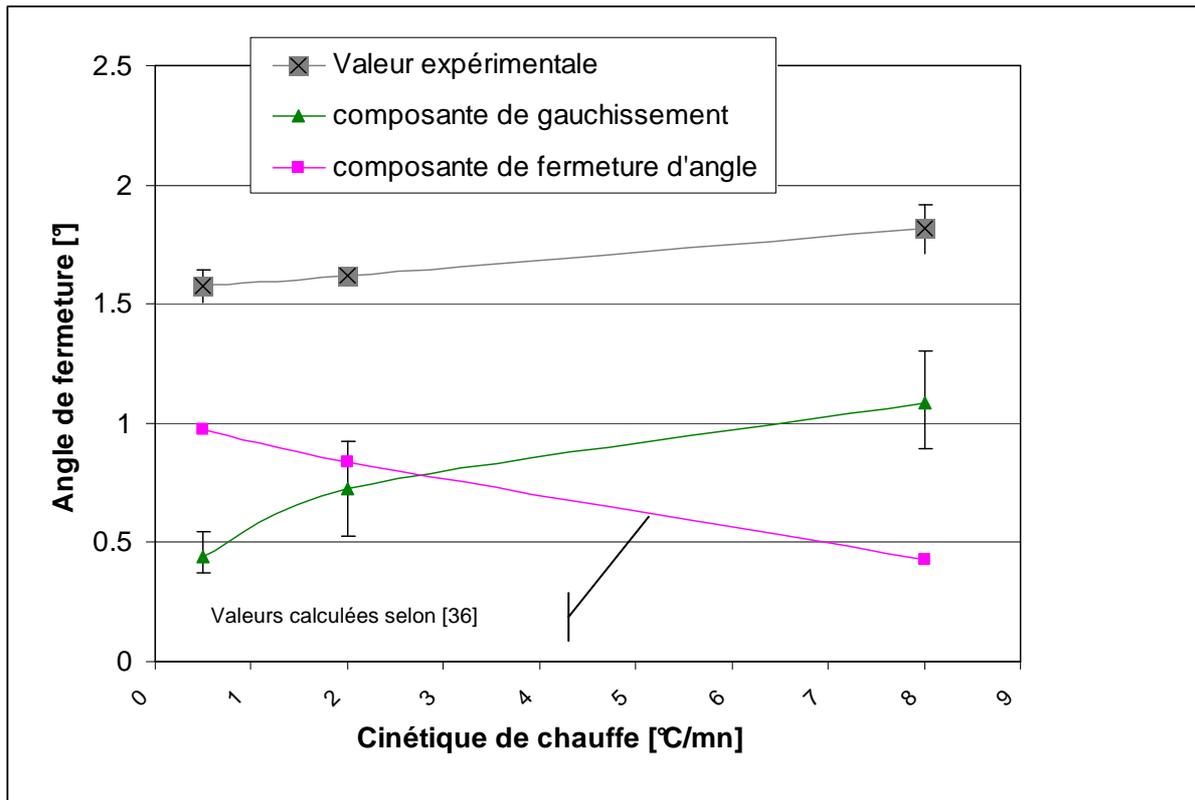


Figure 79 : Décomposition des valeurs expérimentales en fonction de leurs sources selon [38]

Afin d'évaluer l'influence du gauchissement des pannes sur l'angle de fermeture, une comparaison entre le gauchissement de plaques planes et l'angle de fermeture est représentée sur la Figure 80. Cette comparaison est réalisée pour des pièces réalisées à diverses cinétiques de chauffe ainsi qu'avec et sans l'interaction équipement d'infusion-pièce. Ce dernier paramètre permet de faire varier fortement le gauchissement des pièces planes et donc des pannes de pièces en angle.

Il en ressort que malgré une composante de gauchissement variant fortement, plus de 300%, le renfermement d'angle mesuré diminue près de 0.1°. La relation entre le gauchissement et l'angle mesuré apparaît comme étant bien existante, mais elle est faible comparée au mécanisme de fermeture d'angle.

Cette spécificité de nos résultats par rapport à l'état de l'art peut s'expliquer par la géométrie des pièces caractérisées, avec dans notre cas des rayons relativement importants (20mm).

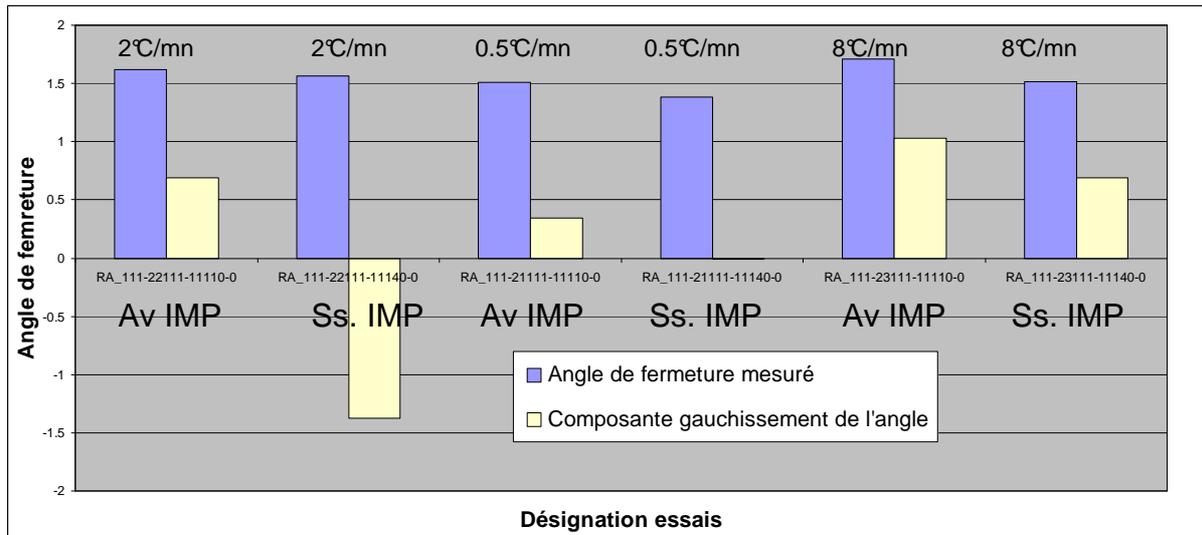


Figure 80: Comparaison entre l'angle de fermeture mesuré et la composante issue du gauchissement selon [38]

→ L'angle mesuré entre les plans moyens des pannes est considéré dans notre étude comme l'angle de fermeture strictement issu de l'anisotropie des propriétés dans le plan et dans l'épaisseur.

V.2.3 Influence de paramètres du produit

V.2.3.1 Variation du rayon

Le mécanisme de fermeture d'angle est, par définition, purement intrinsèque. La valeur du rayon de l'angle n'a, par définition, pas d'incidences sur l'angle de fermeture. La Figure 81 présente les valeurs des angles de fermeture obtenues expérimentalement pour deux rayons différents. Un angle de fermeture moyen de plus de 15% est observé pour un rayon de 100mm par rapport à un rayon de 20mm.

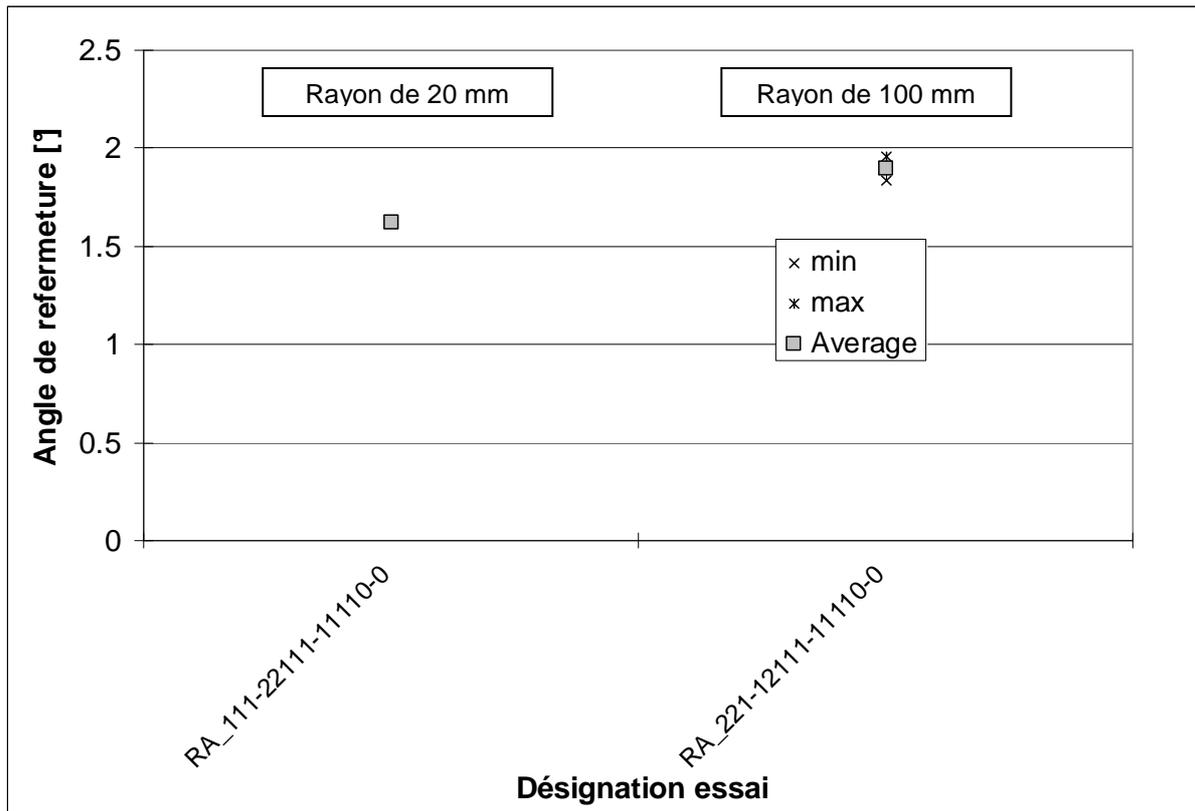


Figure 81: Influence du rayon de raccordement

La fermeture de l'angle peut, en fonction de la valeur du rayon de l'angle être induite par au moins un mécanisme supplémentaire. Le fait que l'angle de fermeture dépende du rayon de l'angle, c'est-à-dire de la longueur de l'arc laisse penser que cette contribution peut trouver son origine dans le gauchissement de cette zone soumise à diverses interactions.

V.2.3.2 Tissu métallique fonctionnalisant

Nombre de structures aéronautiques sont composées de tissus métalliques fonctionnalisant en peau extérieure. Ce tissu permet d'assurer une protection contre la foudre de la pièce. L'intégration d'un tissu métallique rend le stratifié non-symétrique. Ainsi lors du refroidissement, il résulte des déformations induites par le différentiel de coefficient de dilatation du composite carbone-époxy et du composite tissu métallique-époxy. La Figure 82 montre bien l'influence de la présence d'un tissu métallique

sur l'angle de fermeture. Celui-ci décroît significativement, de près de 1 degré, par rapport à une pièce composite symétrique et équilibrée.

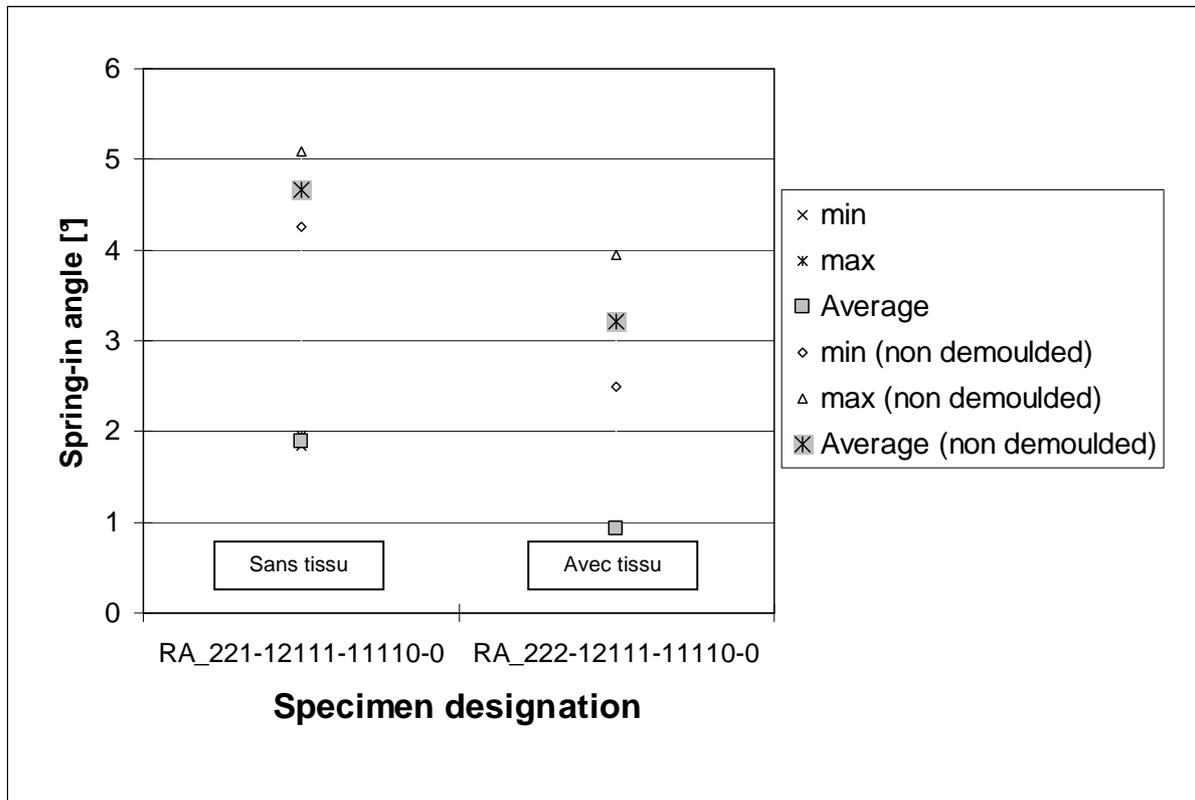


Figure 82: influence de l'intégration d'un tissu métallique en peau

→ Ce paramètre, au vue de son influence significative, doit être pris en compte dans un modèle de prédiction de la fermeture d'angle.

V.2.4 Influence de paramètres du procédé

V.2.4.1 Influence du cycle de polymérisation

Plusieurs auteurs ont montré l'influence du cycle de polymérisation sur l'angle de fermeture (Cf. Chapitre V.1). Afin de valider des résultats dans notre configuration, des échantillons ont été réalisés soumis à deux cycles thermiques différents :

- C1 : 15mn à 120°C + 2h à 150°C

- C2 : 1h à 80°C + 2h à 150°C

Les résultats sont présentés sur la Figure 83. Il apparaît clairement que l'angle de fermeture croît avec une hauteur de palier. Ceci s'explique par le couplage de deux phénomènes :

- Un phénomène chimique, correspondant à l'évolution de l'état de la matière soumis à un cycle de température.
- Un phénomène physique, liés à la dilatation de la matière en fonction de l'évolution du cycle.

Ce couplage rend la compréhension du mécanisme de déformation complexe. Au vu des résultats, et des connaissances préalables du comportement de la résine, il apparaît que la majorité des contraintes se transmette à partir de la gélification de la résine. Ainsi, le différentiel de température entre la gélification et le palier final est proportionnel au niveau de contraintes transmises dans la pièce. Cette hypothèse devra être évaluée par un modèle ad hoc

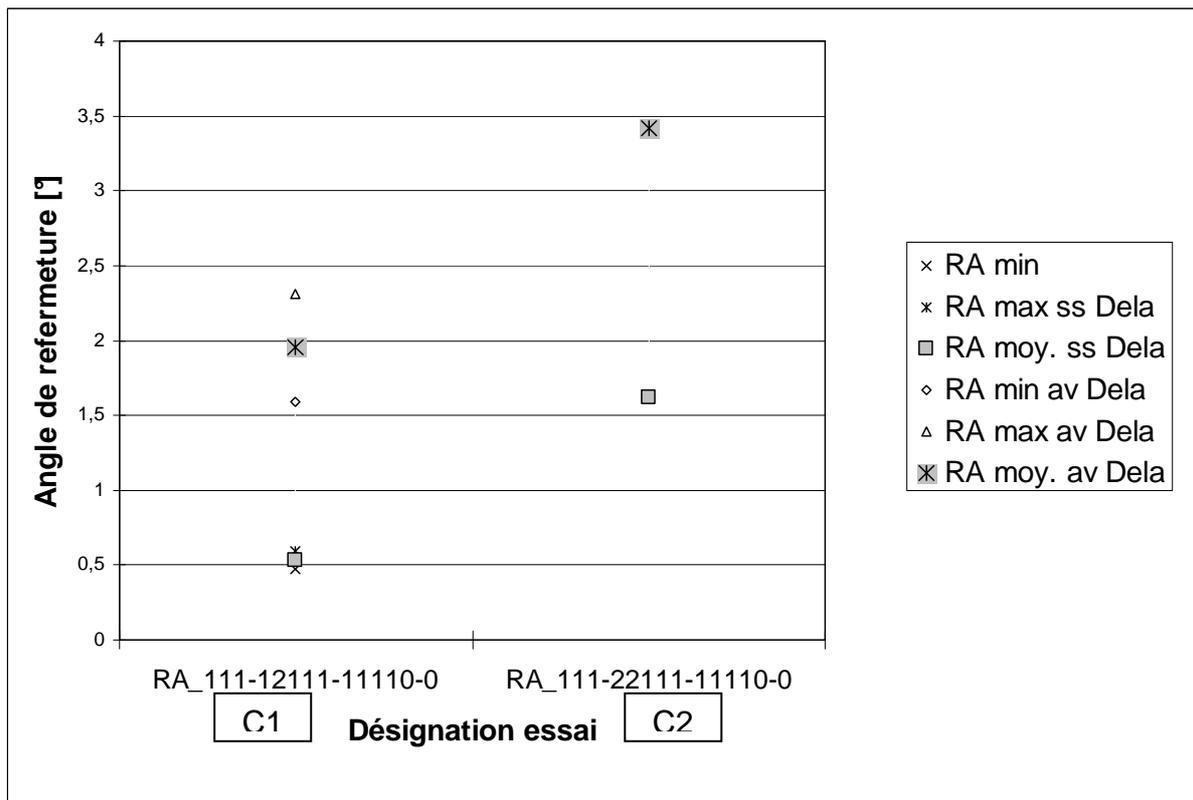


Figure 83: Influence de cycle de cuisson

V.2.4.2 Influence des rampes de montée en température

La variation des vitesses de montée en température entraîne une série de modifications des conditions de mise en œuvre de la pièce :

- Modification des contraintes transmises à la pièce par l'outillage et les équipements d'infusion ;
- Modification de la cinétique de polymérisation et par conséquent de l'évolution du retrait de polymérisation ;
- Modification des contraintes thermique internes.

D'un point de vue compréhension du mécanisme, il paraît difficile de conclure au vue du nombre de modifications de paramètres induits. Ces informations pourront être corrélés avec des calculs numériques afin de déterminer les paramètres influents majeurs.

D'un point de vue industrialisation, le degré de dépendance du mécanisme de déformation est une donnée essentielle pour l'optimisation des paramètres produit processus ressources (cycles, variation d'épaisseur...)

Les résultats des mesures d'angle de fermeture pour différentes rampes de montée (Cf. Figure 84) en température sont présentés sur la Figure 85.

L'angle de fermeture croît avec la rampe de montée en température. Cependant, on remarque le faible écart (environ 10%) entre un cycle à 0.5°C/min et un à 8°C/min.

On remarque également, que l'angle de fermeture avant démoulage ne présente pas de dépendance significative en fonction de la rampe de montée en température. La présence des équipements d'infusion tend à accentuer significativement (facteur 2) l'angle de fermeture de la pièce de part l'augmentation significative de l'anisotropie du complexe.

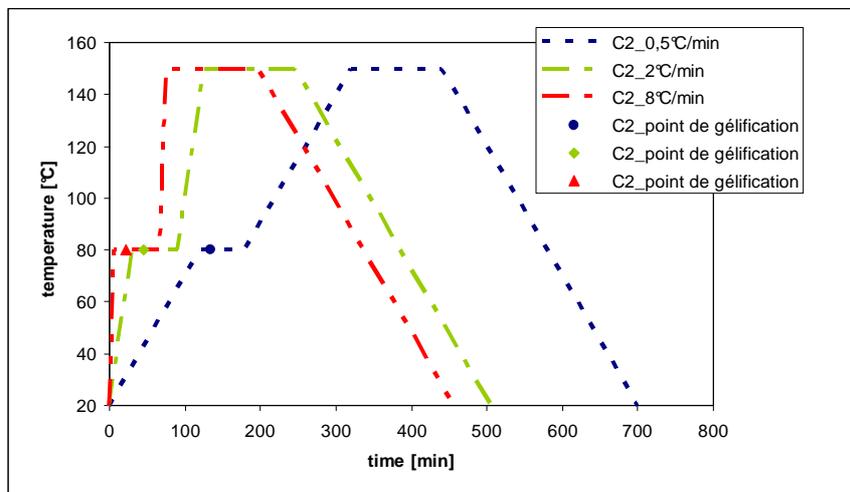


Figure 84: Cycles de température en fonction de la rampe

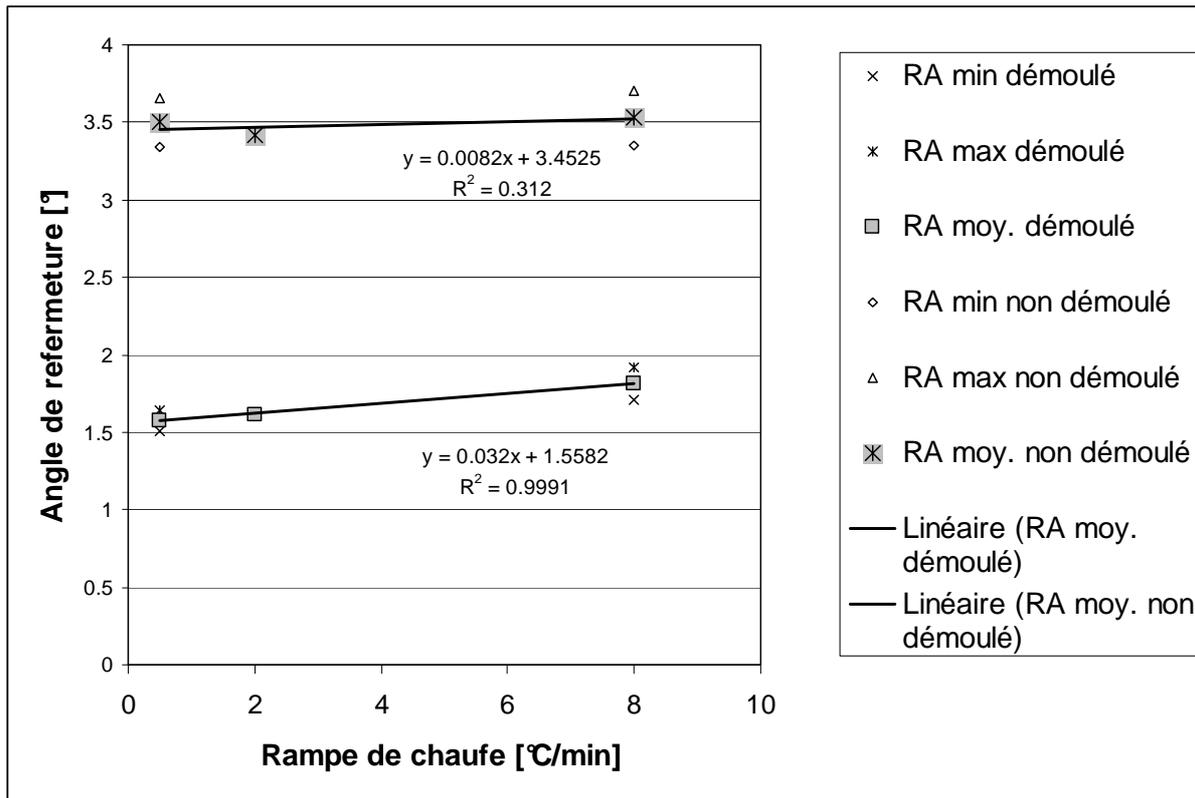


Figure 85: Influence des rampes de montée en température

La différence de tendance entre les angles avant et après démoulage laisse supposer la présence de mécanisme de déformation additionnel. Le rôle des équipements d'infusion sur l'angle de fermeture doit être clarifié au vue de l'impact qu'ils ont sur l'angle de fermeture avant démoulage.

V.2.5 Influences de paramètres ressources

V.2.5.1 Influence de l'interaction pièce-outillage

L'outillage et, en particulier, le matériau d'outillage peut être responsable de transfert de contraintes important. La déformation de pièce plane a été étudiée au chapitre précédent. L'impact que pourrait avoir ce mécanisme sur l'angle de fermeture doit être évalué.

L'influence de l'interaction pièce-outillage peut être évaluée expérimentalement en modifiant les conditions de la surface de moulage. Un film démoulant a été intercalé entre la pièce et la face de moulage de l'outillage. Ainsi, les transferts de contraintes de l'outillage vers la pièce sont fortement minimisés. La comparaison expérimentale

des angles de fermeture avec et sans film démoulant est présentée sur la Figure 86. On remarque que l'angle de fermeture, que ce soit avant ou après démoulage, ne présente pas de dépendance remarquable à la présence ou non de film démoulant à l'interface de moulage.

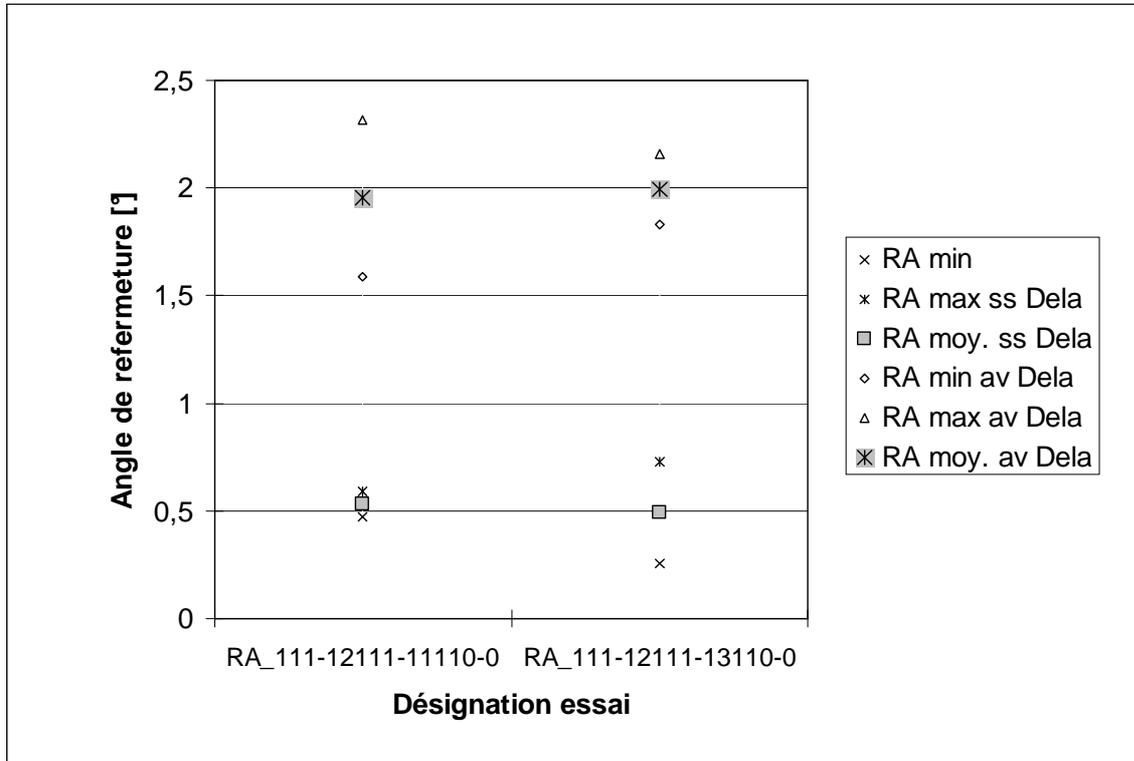


Figure 86: Influence de l'interaction pièce-outillage

L'interaction pièce-outillage n'a dans cette configuration expérimentale, pas d'influence significative.

V.2.5.2 Influences de l'interaction équipement d'infusion-pièce

Le comportement des équipements d'infusion représente une contribution majeure dans la déformée d'une pièce composite initialement plane. Afin d'évaluer expérimentalement si cette interaction peut contribuer à la fermeture d'angle, une série d'essais/mesures a été réalisée en fonction de différentes rampes de température. Celle-ci est présentée sur la Figure 87. L'interaction équipements d'infusion-pièce est fortement minimisée par l'utilisation d'un film démoulant perforé entre le média de distribution et la pièce.

On observe clairement une dépendance à l'interaction équipements d'infusion-pièce de l'angle de fermeture. L'angle de fermeture est plus important (jusqu'à près de 30%) avec que sans le transfert de contraintes issues des équipements d'infusion.

On remarque toutefois l'absence de linéarité entre les points expérimentaux obtenus en retirant les équipements d'infusion.

L'angle de fermeture mesuré n'est donc pas le résultat d'un mécanisme de déformation purement intrinsèque (lié à la pièce), il résulte de plusieurs mécanismes de déformation, dont l'interaction équipement d'infusion outillage.

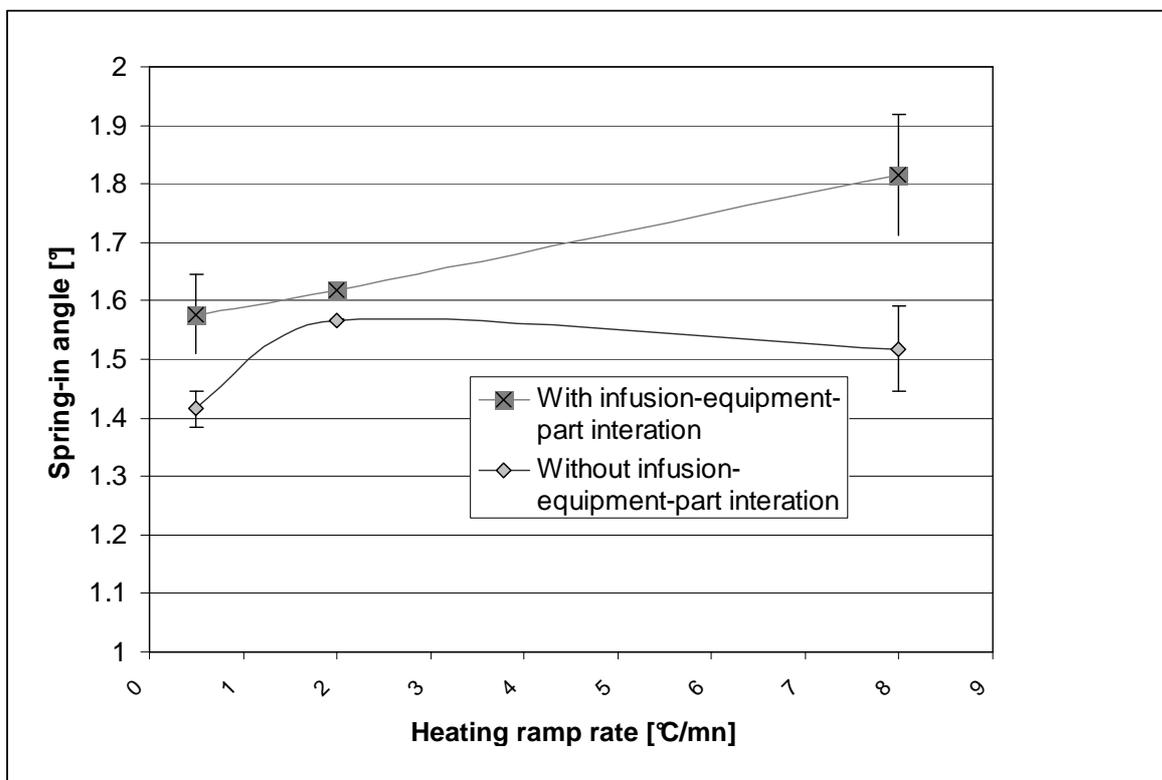


Figure 87: Influence des équipements d'infusion [40]

V.2.6 Bilan et conclusions

La littérature est riche de travaux portant sur l'étude du renfermement d'angle, notamment dans le cas de mise en œuvre par prepreg-autoclave. Nos travaux se concentrent sur l'analyse et la compréhension du renfermement d'angle dans le cas de pièces réalisées par procédé d'infusion de résine. La mise en œuvre par procédé d'infusion induit des spécificités fortes pouvant contribuer significativement à la déformation des pièces.

Les résultats expérimentaux montrent la dépendance forte des paramètres produit-procédé-ressources sur l'angle de fermeture. Cette dépendance ne peut être négligée et doit être prise en compte dans les modèles de prédiction. Cependant, des travaux expérimentaux approfondis restent nécessaires afin d'isoler avec certitudes les phénomènes de renfermement d'angle par rapport aux gauchissements des panes.