

Etat de l'art sur les défauts de composites dus à la mise en œuvre du matériau

A la différence des matériaux comme les métaux, la mise en œuvre des matériaux composites est particulière dans le sens où le matériau final et la géométrie de la pièce sont souvent obtenus simultanément et les propriétés de la structure finale dépendent à la fois des composants, que ce soit les fibres ou la matrice, et de la manière dont ils sont mis en œuvre.

Cette partie n'a pas pour but de présenter les différents procédés de fabrication de pièces composites, mais comment apparaissent les défauts pendant la mise en œuvre. L'étude est centrée sur les composites à renfort continu qui sont généralement mise en forme par : Resin Transfer Moulding (RTM), Infusion, Préimprégnés ThermoDurcissables (TD), Préimprégnés ThermoPlastiques (TP), ...

Lors de la mise en forme des composites, plusieurs types de défauts peuvent apparaître [1] [2] comme des ruptures de fibres, des désalignements de fibres, des plissements du renfort ou des pores résiduels. L'étude portera sur ces deux derniers défauts qui ont été étudiés par E.Gazo-Hanna et al. [3] et qui sont illustrés sur la figure 1. Sur l'échantillon A3 et A12, des plissements sont observés alors que sur l'échantillon A7 présente des pores.

Ces défauts affectent les propriétés mécaniques du composite, que ce soit les défauts de plissement [4], ou de porosité [5], aussi bien en quasi-statique qu'en en fatigue [6]. C'est pour cela que l'étude sera complétée par l'analyse de l'endommagement en fatigue du composite avec défauts.

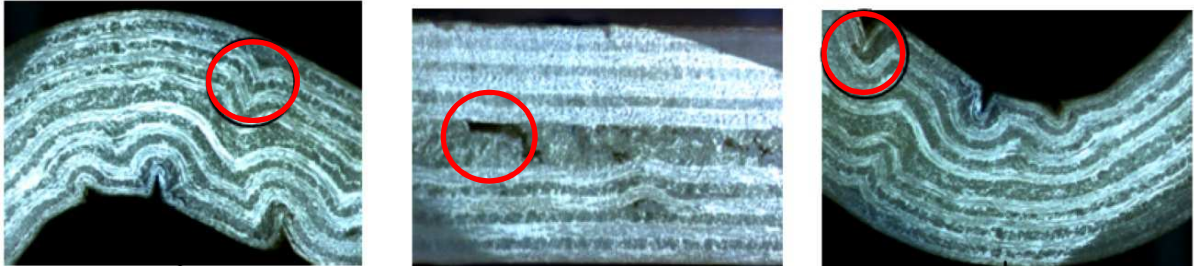


Figure 1: Micrographies obtenues pour l'échantillon A, mise en évidence des plissements (échantillon A3 à gauche et A12 à droite) et des pores (échantillon A7 au centre) [3]

I.1 Les défauts de plissement

Les défauts de plissement sont définis, dans les stratifiés multidirectionnels, par les ondulations hors plan, ou dans le plan, d'un ou plusieurs plis [7]. Il existe 3 types de plissements comme le précise P.Hallander et al. [8].

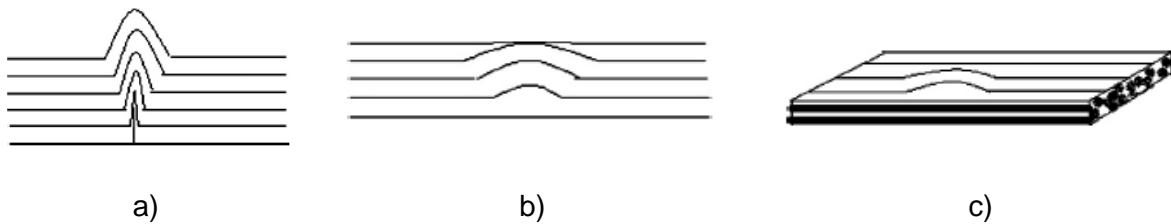


Figure 2 : Schéma des 3 types de plissement, a) le plissement hors plan dit « wrinkle », b) le plissement hors plan dit « waviness » et c) le plissement dans le plan dit « in-plane waviness » [8]

La figure 2 montre les 3 géométries différentes de plissement en fonction de sa position dans le stratifié, du nombre de plis qu'il déforme, du fait qu'il soit dans le plan des fibres ou hors-plan des fibres et du fait que la déformation subit par les plis soit seulement interne à l'épaisseur ou se répercute sur les plis extérieurs comme pour le défaut dit « wrinkle ».

Les défauts de plissement sont définis par plusieurs paramètres. Comme le montre la figure 3, un plissement se caractérise par son amplitude $\bar{\delta}$, sa période λ et son angle maximum de désalignement θ_{\max} [7]. L'amplitude $\bar{\delta}$ définit la « hauteur » du plissement, c'est-à-dire la différence de position entre le haut du premier pli et le haut de l'entre deux plis suivant. La période λ donne une indication sur la distance qui sépare deux plis et l'angle θ_{\max} désigne l'angle maximum entre la normal à la fibre et la normal au pli.

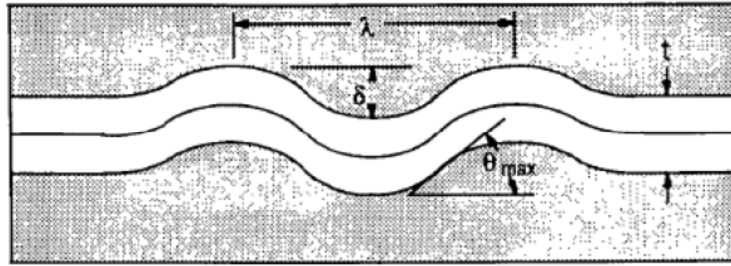


Figure 3 : Définition des paramètres géométriques d'un défaut de plissement [4]

1.1.1 Les paramètres procédés à l'origine des phénomènes de plissement

Les paramètres qui vont influer sur la formation des défauts de plissement sont identiques quel que soit le procédé de mise en œuvre utilisé. La figure 4 présente le diagramme d'Ishikawa [9] des paramètres de procédés qui influent sur la formation d'un plissement [10].

Par exemple, Lightfoot et al. [11] ont montré l'influence des interactions entre les plis et l'outillage, qui provoque du cisaillement, sur la formation du plissement. Hallander et al. [8] ont étudié la formation de plissements due au formage de tissus préimprégnés sur des géométries complexes. D'autres études ont démontré l'influence des chargements en compression lors du formage [12], l'influence de l'automatisation du drapage [13], l'influence de la vitesse de refroidissement et du Coefficient Thermique d'Expansion (CTE) du matériau de l'outillage en contact avec le stratifié [14].

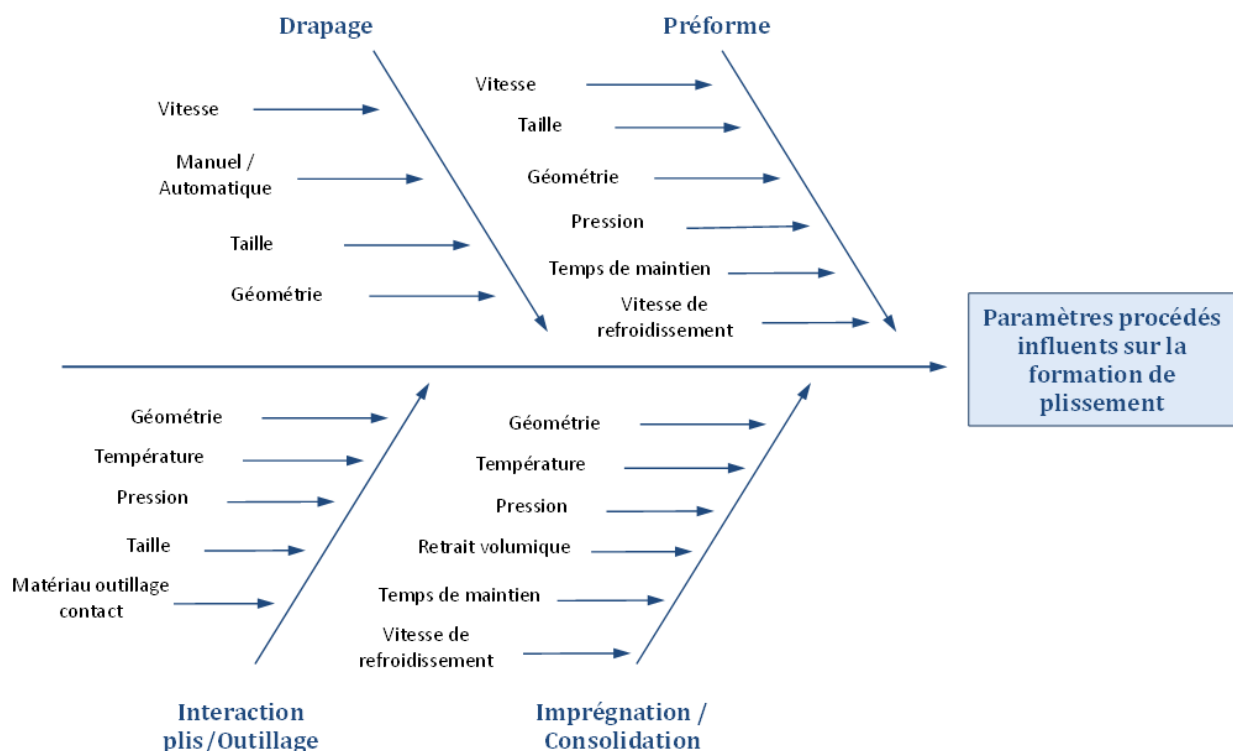


Figure 4 : Paramètres procédés influents sur la formation de plissement

1.1.2 Les effets des plissements sur le comportement mécanique du composite

Les défauts de plissement vont de manière générale diminuer les propriétés mécaniques du composite stratifié, comme cela est visible sur la figure 5 qui illustre la baisse de la résistance en compression, sur un stratifié polysulfone/fibre de carbone, par rapport à la fraction de plissements dans un pli à 0° [7].

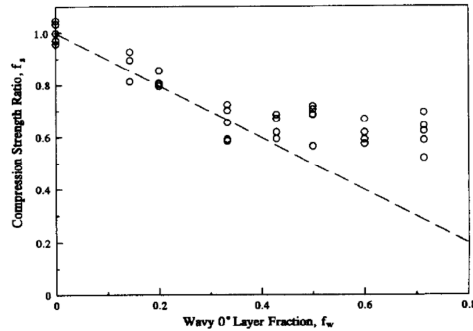


Figure 5 : Résistance en compression en fonction de la fraction de plissement dans le pli [7]

Les 3 paramètres caractéristiques d'un plissement ont une certaine influence sur les propriétés mécaniques du composite. L'étude de Bloom et al. [15] a mis en évidence l'influence de l'angle de désalignement θ sur la résistance en traction d'un stratifié fibre de verre/résine époxy. Le tableau 1 illustre la diminution de la charge maximum et de la charge à la première rupture, qui sont définis sur la figure 6, avec l'augmentation de l'angle de désalignement θ (les angles α et β sont des résultantes de l'angle θ). Cette diminution varie entre 3% et 50%.

Strength values and reductions relative to baseline.

Specimen	Misalignment angle θ (°)	Loop angle α or β (°)	First drop (MPa)	Max strength (MPa)	First drop (% reduction)	Max strength (% reduction)
Base UD	–	–	720.3	720.3	0	0
Base WV	–	–	644.0	644.0	0	0
50% UD1	29.2	12	448.6	621.6	38	14
50% UD2	Indiscernible	–	552.3	697.3	23	3
50% WV1	33.4	>90	432.3	432.3	33	33
50% WV2	39.4	10	322.6	391.4	50	39
100% WV1	25.6	>90	485.5	507.4	25	21
100% WV2	30.5	14	352.4	399.0	45	38

Tableau 1: Valeurs des forces en traction et de sa diminution pour différents angles de désalignement. [15]

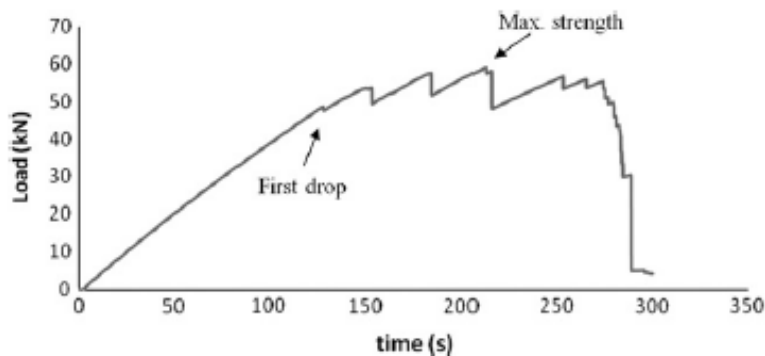


Figure 6: Courbe de chargement en fonction du temps pour un échantillon [15]

1.1.3 Les différents moyens de caractérisation des défauts de plissement

L'objectif étant de reproduire des défauts de plissement afin de pouvoir le tester mécaniquement par la suite il faut pouvoir le caractériser sans détruire l'échantillon. En effet, le défaut de plissement étant un défaut géométrique, il est difficile de le caractériser précisément sans détruire la pièce. Il est donc préférable de détecter les plissements dans le composite avec des techniques de Caractérisation Non Destructive (CND). De nombreux articles et études définissent les différentes techniques de CND adaptées aux matériaux composites [16] [17] [18] [19].

Les défauts de plissement peuvent être caractérisés par l'étude de la propagation d'ondes ultrasonores. Plusieurs travaux traitent de ce sujet comme ceux de Dumoulin et al. [20], de Chiao [21], ou plus récemment de Lopez et al. [22].

La figure 7 illustre bien les différents plissements qui se forment sur l'image de traitement des ondes ultrasonores. Ces ondes sont un bon outil pour la détection des plissements mais il est difficile de quantifier ceux-ci. Notamment l'intensité du plissement qui correspond au rapport entre sa hauteur et sa longueur [22] reste difficile à évaluer.

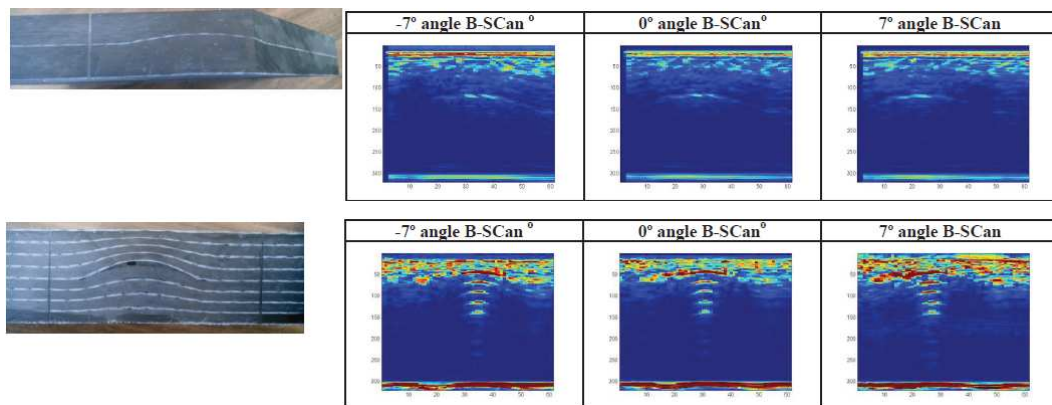


Figure 7 : Caractérisation par ondes ultrasoniques de différentes intensités de plissement [22]

Les ultrasons représentent la technique CND qui donne les meilleurs résultats pour caractériser ces défauts mais la précision des résultats ne permet pas d'obtenir de bons résultats sur les paramètres caractéristiques. Pour obtenir une vision précise du défaut et pour identifier ces paramètres, il est nécessaire de passer par une technique d'analyse d'images 2D ou 3D qui est une technique de caractérisation destructive.

En effet, l'analyse d'image 2D permet d'observer le plissement finement et de caractériser précisément ses paramètres, comme dans l'étude de J. S. Lightfoot et al [11]. Ils caractérisent les défauts de plissements par Microscopie Optique (MO). La figure 8 montre une coupe 2D par MEB d'un échantillon présentant un plissement. Il est alors facile d'identifier les défauts et mesurer les paramètres caractéristiques de ceux-ci comme l'angle de désalignement sur la figure 8.

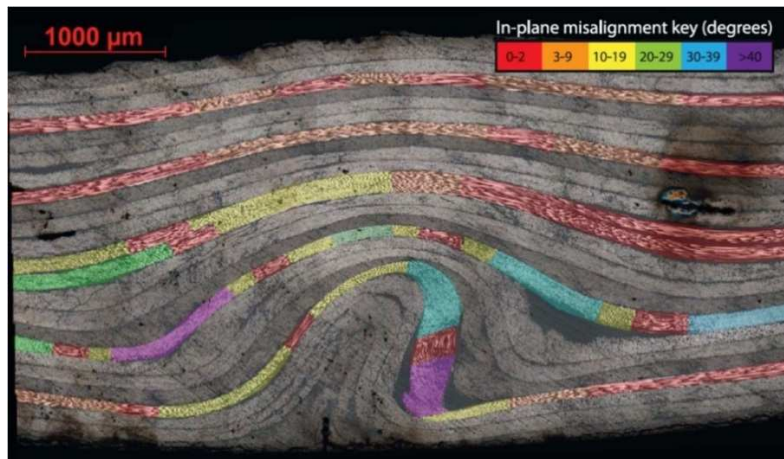


Figure 8 : Observation d'un échantillon avec un plissement à l'aide d'un MO [11]

L'analyse des images par MO et par MEB permet d'obtenir une bonne estimation de la morphologie des plissements et d'estimer leur quantité. Les différents paramètres peuvent être caractérisés tels que l'amplitude δ des plissements, leur période λ et leur angle de désalignement maximum θ . Cependant ces techniques sont des représentations 2D qui ne sont pas forcément représentatives de l'échantillon global ou même d'une structure. Cette difficulté de représentation des défauts de plissement au sein même d'un échantillon ou d'une structure peut se résoudre par l'utilisation d'un système d'acquisition d'image 3D comme la tomographie.

Il est possible de trouver plusieurs études dans la littérature qui s'intéresse à la caractérisation de composites par tomographie [23] et plus précisément sur les défauts de plissement comme dans l'étude de Makeev et al. [24]. Il caractérise ces défauts par tomographie et le résultat est visible figure 9.

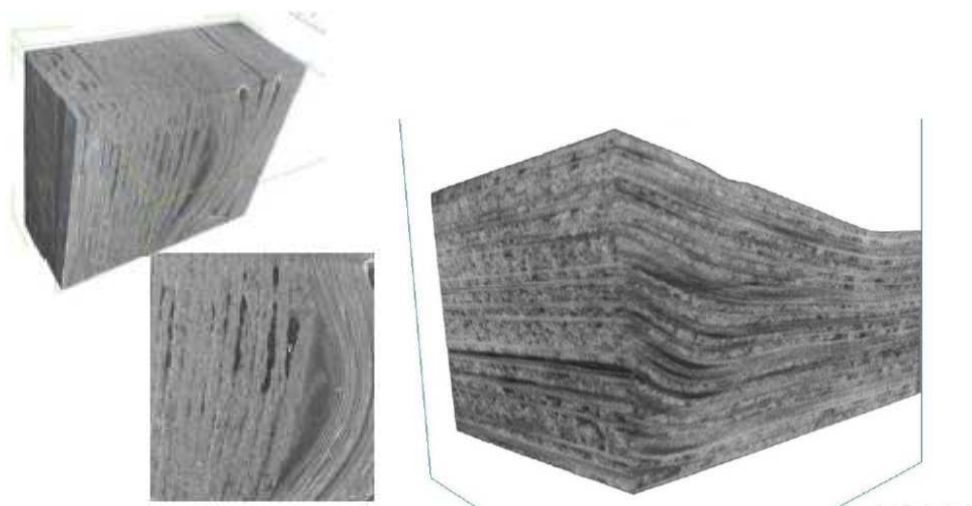


Figure 9 : Défauts de plissement caractérisés par tomographie [24]

Le désavantage de cette technique est que les échantillons analysés doivent être de petites dimensions.

Conclusion et perspectives sur les défauts de plissement

Les défauts de plissement sont définis par des ondulations, dans le plan ou hors plan, d'un ou plusieurs plis. Ils apparaissent lors de la mise en œuvre du matériau que ce soit lors de l'étape de préforme, de drapage ou d'imprégnation, et dépendent d'un certain nombre de paramètres comme la taille des pièces, la géométrie plus ou moins complexe, la température de maintien ou la pression qui agit sur la viscosité de la résine. Ces défauts de plissement se caractérisent par 3 grandeurs qui ont une certaine influence sur les propriétés du matériau : l'amplitude d'ondulation δ , la période d'ondulation λ et l'angle de désalignement θ . Ces plissements diminuent plus ou moins les propriétés mécaniques du composite, que ce soit en quasi-statique ou en fatigue, en compression, en traction, en flexion ou en cisaillement. Du fait que ce défaut est géométrique, les moyens de détection sont souvent des analyses d'images, que ce soit en microscopie optique, au MEB ou en tomographie. Mais il est aussi possible de les caractériser avec des essais ultrasonores.

Les plissements génèrent ainsi des singularités géométriques et matérielles dans le matériau composite. Ces singularités génèrent des concentrations de contraintes locales et des changements de propriétés locales des matériaux (par exemple, sous un plissement, une « poche de résine » se crée, sans renfort). Ces éléments se traduisent par des abattements des propriétés mécaniques.

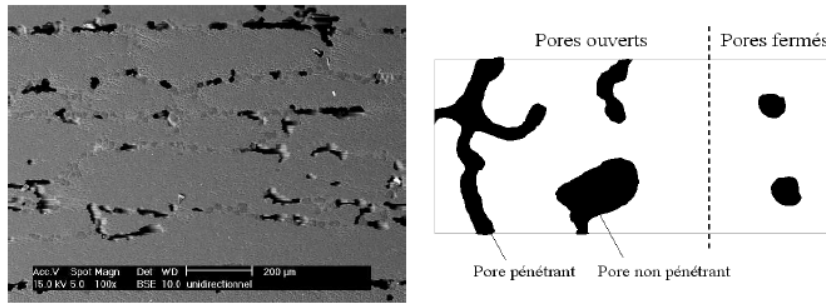
Il faut maintenant comprendre si la caractérisation de ces défauts et l'analyse de ces influences sur les propriétés mécaniques, sur une éprouvette, est réaliste par rapport à la répartition de ces défauts et de leurs influences sur le comportement mécanique d'une structure telle qu'une pale d'éolienne.

1.2 Les défauts de porosité

Selon le glossaire international d'hydrologie, la porosité est une propriété d'un milieu, d'un sol ou d'une roche à comporter des pores, c'est-à-dire des vides interstitiels, interconnectés ou non. Par rapport à cette définition, dans un composite, le défaut de porosité pourrait être représenté par une petite cavité qui renferme de la matière gazeuse. La figure 10 montre des exemples de pores au sein d'un matériau ainsi que la nomenclature classifiant les pores en fonctions de leurs dimensions.

Selon les études de Schoeller en 1955 [26], les pores se distinguent en 2 catégories représentées à gauche sur la figure 10 :

- Les pores ouverts composés de vides intercommunicants connectés à la partie extérieure du matériau
- Les pores fermés, isolés à l'intérieur du matériau et ne permettant aucune perméabilité.



Rayon des pores	Classe	Etat de l'eau
< 0,1 μm	Microporosité	Eau de rétention exclusivement
0,1 à 2500 μm	Mésoporosité	Eau capillaire et eau gravitaire
> 2500 μm	Macroporosité	Eau gravitaire dominante

Figure 10 : Pores(en noir) et nomenclatures relatives à la taille des pores [25] [26]

Les pores sont classés par taille entre les micro-pores ($r < 0.1 \mu\text{m}$), les méso-pores ($0.1 < r < 2500 \mu\text{m}$) et les macro-pores ($r > 2500 \mu\text{m}$).

Dans les milieux industriels aéronautique et aérospatiale, il est admis qu'une pièce structurale comportant un taux volumique de porosité supérieur à 1% doit être rebutée, alors que dans les autres applications, la tolérance peut monter jusqu'à 5% [27] [28].

1.2.1 Les paramètres de procédé à l'origine des défauts de la porosité

Les phénomènes de création de la porosité sont différents en fonction du procédé de mise en œuvre mais dans le cas de composites stratifiés, certains paramètres sont communs à la formation de la porosité. Les causes d'apparition de pores au sein d'un composite ont deux causes possibles : mécanique et thermodynamique.

- Causes mécaniques :

La première origine mécanique de la formation de la porosité est l'emprisonnement d'air lors de la mise en œuvre de la pièce. Cet emprisonnement d'air peut se produire lors de l'imprégnation de la résine par les fibres où des macro-pores se forment entre les mèches ou des micro-pores se forment au sein même des mèches comme le montre la figure 11.

L'écoulement de la résine étant gouverné par sa viscosité il est possible de voir apparaître des macro-pores lorsque celle-ci est forte. Si la viscosité de la résine est faible, alors l'écoulement de la résine est gouverné par la capillarité et des micro-pores pourront apparaître [30] [31] [32]. Les paramètres de l'étape d'imprégnation qui sont influents sont : la pression, la perméabilité du renfort, la viscosité de la résine et donc la température, mais aussi le nombre de points d'injection.

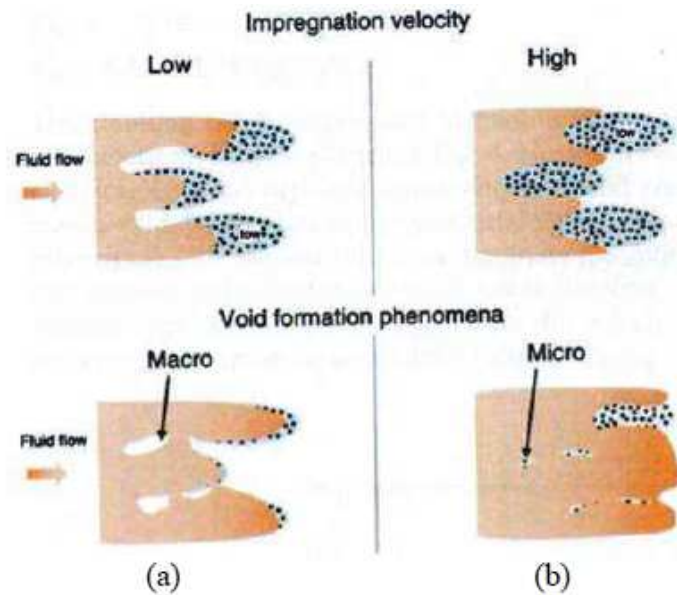


Figure 11 : Formation des macro-pores et micro-pores en fonction de la vitesse de déplacement de la résine lors de l'imprégnation d'un renfort [29] : a) force de capillarité prédominante, b) force de viscosité prédominante

L'apparition de la porosité par voie mécanique peut aussi se produire lors de l'étape de drapage, que ce soit en manuel ou en automatique. Des micro-pores peuvent aussi être observés lorsqu'une fibre est rompue, lorsqu'il y a formation le plissement d'un pli, ou lors d'un chevauchement ou d'un décalage entre deux plis. Peu d'études se sont intéressées à la création de porosité lors de l'étape de drapage. Ranganathan et Pitchumani [33] [34] ont étudié la modélisation du comportement des pores lors du drapage automatisé d'une pièce composite thermoplastique AS-4PEEK. Il en résulte que la vitesse de dépose des fibres, la pression d'application, la température de dépose ainsi que la configuration du rouleau sont des paramètres influents sur la formation de la porosité. Cette étude peut être extrapolée à la dépose de fibres de carbonnes préimprégnées d'un thermodurcissable comme la résine époxyde. Dans ce cas-là il faudra aussi prendre en compte la pression de compactage.

La dernière forme d'apparition de la porosité par voie mécanique est la présence de particules de grande taille ou d'un amas de celles-ci qui seraient présentes dans le préimprégné.

- Causes thermodynamiques :

Le diagramme de phase de l'eau montre qu'une bulle de vapeur, dans la phase liquide, se forme soit en augmentant la température localement dans le liquide [35], soit en provoquant une rapide décompression [36]. Il est alors probable que la polymérisation soit le siège de créations de pores. En effet, lors de la polymérisation, le système supporte : i) une augmentation de la température, ii) une dépression et une augmentation de la concentration en espèces diffusantes, notamment si le préimprégné contient des résidus de solvant ou d'humidité qu'il aurait absorbés lors de sa phase de fabrication.

La dépression se produit au moment de la polymérisation, mais aussi généralement à celui de la migration de la résine à travers les fibres, ou lors de l'évacuation de l'excès de résine et des matières volatiles. Boey et al. [37] ont démontré qu'il existait une dépression optimale, pour un moulage au contact, qui permet d'extraire une partie des matières volatiles et certains pores. Cependant celle-ci contribue à l'augmentation de la taille des pores déjà créés. En autoclave, Tang et al. [38] ont mis en évidence le fait que la pression hydrostatique appliquée sur la vessie de la pièce, lors de la polymérisation, a une certaine influence sur le taux de porosité, avec un taux volumique de porosité inférieur à 5% si la pression est supérieure ou égale à 5bar. C'est pour cela que lors de la mise en œuvre des matériaux composites, la pression appliquée et la dépression doivent être optimisées en fonction des paramètres rhéologiques des matériaux pour éviter la croissance des pores.

L'augmentation de la température va favoriser l'apparition de pores mais elle va aussi favoriser leur croissance en aidant la diffusion des espèces mobiles au sein du matériau [39].

L'ensemble des paramètres des différents procédés de mise en forme des composites hautes performances est résumé dans le diagramme d'Ishikawa en fig. 12

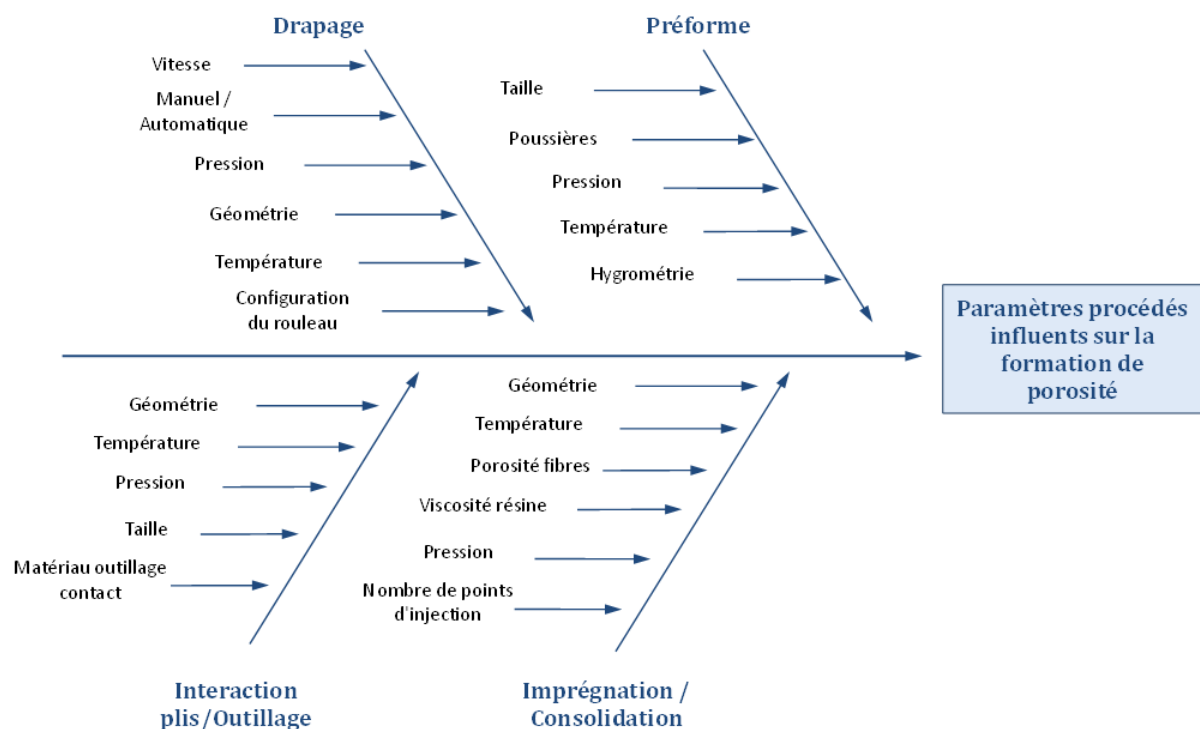


Figure 12 : Paramètres procédés influents sur la formation de la porosité

1.2.2 Les effets des pores sur le comportement mécanique du composite

Les pores dans les composites représentent des défauts très importants qui ont une certaine influence néfaste sur les propriétés mécaniques du composite ce qui explique pourquoi il y a eu beaucoup d'études faites sur ce sujet.

Les différents auteurs sont tous en accord avec le fait qu'en dessous d'un certain pourcentage de taux volumique de porosité, compris entre 0.5 et 1% en fonction du matériau étudié, les pores n'ont pas d'influence sur le comportement mécanique de la pièce, à condition qu'ils soient bien répartis dans l'espace.

À noter que le comportement mécanique est affecté dès qu'un taux volumique de porosité supérieur à 1% est atteint. Les pores ont notamment une forte influence sur la résistance au cisaillement interlaminaire (ILSS pour InterLaminar Shear Stress). La figure 13 montre la diminution de l'ILSS en fonction du taux volumique de porosité pour un matériau composite carbone/époxy pour différentes études [25]. La dispersion des résultats des différents travaux est due essentiellement à la nature du matériau, différente pour chaque étude (préimprégné ou nappe, types de fibre ou types de résine) [27] [38] [40] [41] [42] [43]. La diminution moyenne de l'ILSS est estimée à 6% par unité volumique de taux de porosité pour un stratifié carbone/époxy. Les travaux de Wisnom et al. [44] ont mis en évidence le fait que les pores, qui sont suffisamment grands (diamètre > 0.2 mm), sont à l'origine de l'amorçage de fissures : la présence de porosité diminue la surface de contact entre la matrice et les fibres ce qui favorise la rupture en cisaillement interlaminaire.

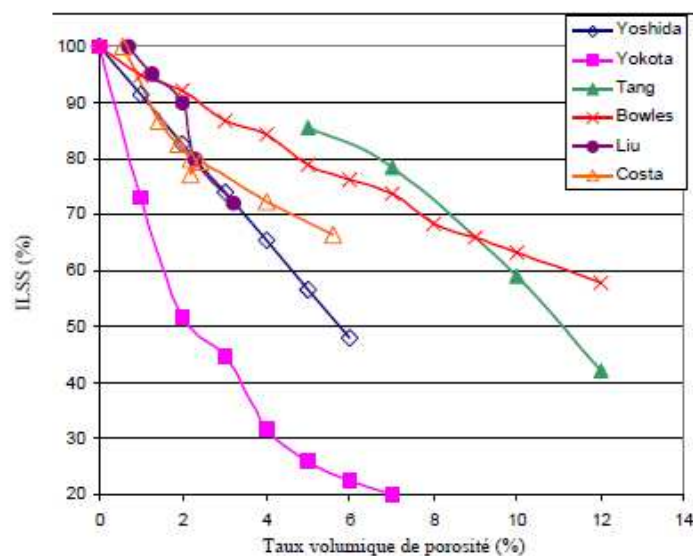


Figure 13 : Variation relative de l'ILSS en fonction du taux volumique de porosité pour des matériaux composites carbone/époxy [25]

La porosité affecte donc beaucoup le cisaillement interlaminaire en statique mais aussi en dynamique. Les travaux de Costa et al. [43], repris par Müller de Almeida et al. [45] pour une sollicitation en flexion statique puis dynamique ont défini un modèle permettant d'estimer la durée de vie de l'échantillon N (en nombre de cycle) en fonction de sa ténacité H (évaluée empiriquement), de sa contrainte à rupture en flexion σ_{max} mesurée en statique et de la qualité du stratifié, représenté par l'atténuation du signal ultrasonore qui est fonction du taux de porosité (1) :

$$\log(N) = 9,1 \left(1 - \frac{\sigma_{max}}{H(\alpha)^{-m}} \right) \quad (1)$$

Le nombre de résultats obtenu en fatigue n'était pas cependant suffisant pour confirmer la validité de la relation. Elle peut néanmoins être utilisée pour déterminer qualitativement l'influence néfaste de la porosité sur le comportement mécanique en fatigue d'une pièce composite carbone/époxy.

En ce qui concerne les autres propriétés mécaniques en traction, en compression ou en cisaillement plan, l'influence de la porosité est moins importante bien que non négligeable [27] [46].

Les porosités génèrent ainsi des singularités géométriques et matérielles dans le matériau composite. Ces singularités génèrent des concentrations de contraintes locales et des changements de propriétés locales des matériaux, une porosité est une « poche de vide » sans renfort et sans résine. Ces éléments se traduisent par des abattements des propriétés mécaniques.

1.2.3 Les différents moyens de caractérisation de la porosité

Il se révèle difficile d'observer et de quantifier les pores dans leur ensemble ce qui limite l'étude de leur formation et de leur influence. Il existe cependant certains outils de caractérisation qui amènent à un résultat correct. L'étude a comme perspective de caractériser mécaniquement les échantillons ayant des défauts de porosités, c'est pour cela que l'étude se base sur des moyens de caractérisation non-destructifs. Cependant, il existe des méthodes de caractérisation destructives qui peuvent être utilisées dans un cas spécifique, comme la dégradation chimique qui donne de bons résultats sur le taux de porosité mais qui ne donne pas d'informations sur la répartition des pores ou leur morphologie.

A. Analyse d'images

L'analyse d'image est le procédé le plus utilisé dans l'étude des matériaux pour caractériser morphologiquement et quantitativement la porosité, mais c'est aussi le procédé le plus ancien avec des premières recherches sur le sujet dans le milieu du XIX^{ème} siècle par le géologue A. Delesse. Ensuite, les travaux sur l'analyse d'image ont été fortement développés sur les céramiques, notamment avec les études d'Aliotti [47] et Redon et al [48]. Ces deux études définissent le protocole expérimental à suivre pour caractériser la microstructure d'une céramique ou d'un béton renforcé par des fibres métalliques.

L'échantillonnage doit d'abord être bien préparé pour pouvoir valider et généraliser les résultats obtenus à l'intégralité de la pièce analysée [49]. La surface à analyser est ensuite préparée par attaque chimique et/ou polissage [50] [51].

L'analyse d'images peut alors être utilisée. Elle se fera avec la technique la mieux adaptée, en fonction du matériau analysé et de l'échelle de travail. La microscopie optique est généralement utilisée, ou la Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Le microscope optique peut aller jusqu'à un grossissement x100 mais son utilisation est limitée par la résolution en épaisseur (quelques microns) et nécessite une surface d'échantillon très plate. Le MEB peut aller à des grossissements bien plus élevés, jusqu'à x100000, mais l'échantillon doit néanmoins être conducteur ce qui induit une étape de métallisation de l'échantillon pour le cas d'un composites à matrice polymère.

La micrographie est acquise sous format numérique à l'aide généralement d'une caméra CCD (Charge-Coupled Device) et d'un logiciel.

Elle est ensuite traitée afin d'extraire les informations intéressantes comme le taux surfacique de porosité comme cela peut être observé sur la figure 14 et, grâce à une étude statistique, ces résultats peuvent être généralisé à l'ensemble de la pièce [52]. En utilisant des relations stéréométriques, il est possible d'obtenir les caractéristiques d'un matériau dans l'espace R^3 à partir des mesures réalisées dans l'espace R^2 , comme dans les travaux de Russ et al. [48].

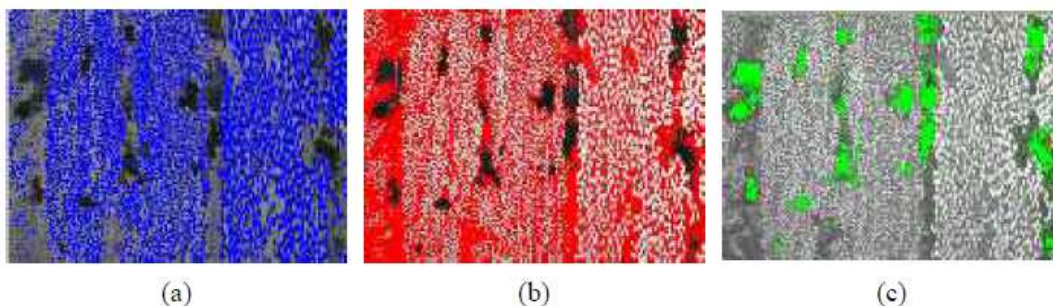


Figure 14 : Identification et quantification des différentes phases composant un stratifié carbone/epoxy avec (a) bleu = fibres de carbone, (b) rouge = matrice epoxy et (c) vert = porosités [25]

L'analyse d'image est la technique la plus fiable et la plus informative (localisation, morphologie) sur la porosité. Cependant c'est un procédé qui est une simple observation d'échantillons, aux dimensions faibles comparées aux structures étudiées. Il faut donc faire un vrai travail sur l'échantillonnage afin de pouvoir généraliser les résultats et en déduire la représentation des pores au niveau de la structure.

B. Micro-Tomographie

La micro-tomographie est une technique d'analyse 3D récente qui fournit une image volumique de la répartition du coefficient d'absorption linéaire des rayons X (noté μ). Pour le cas d'un matériau composite stratifié, les différents matériaux constituants absorbent différemment les rayons X et il est alors possible d'extraire par segmentation une image 3D de la microstructure du composite.

Les travaux de Schell et al. [53] amènent à une cartographie 3D du réseau fibreux et des pores au sein d'un composite stratifié verre/époxy comme illustrée sur la figure 15. Ces travaux ainsi que ceux de Saint-Martin [54], décrivent le protocole pour obtenir une cartographie 3D de la porosité dans les composites. Le taux volumique de porosité est alors calculé avec précision et des analyses de la répartition des pores et de leurs morphologies peuvent être tirées à partir de ces résultats.

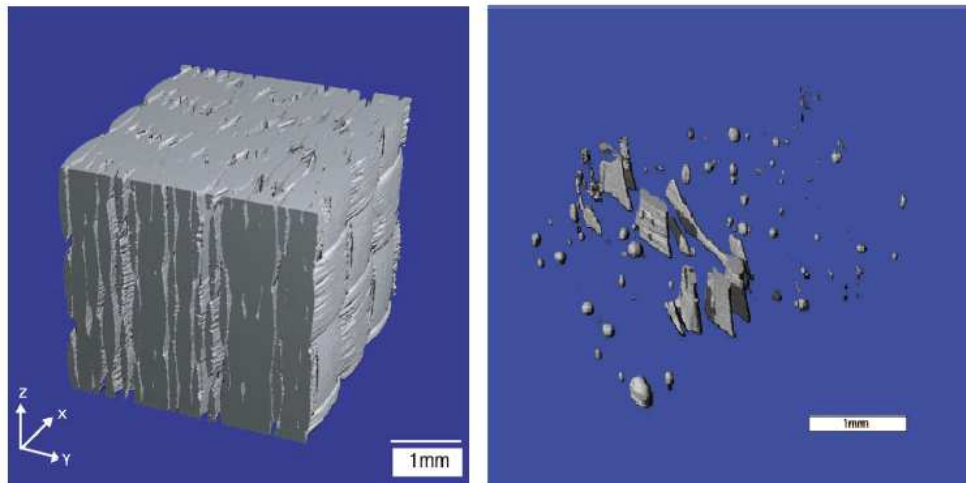


Figure 15 : Représentation 3D de la micro-tomographie d'un composite stratifié fibre de verre/époxy, avec à gauche le réseau de fibre et à droite les porosités. [53]

Cependant ce procédé reste très onéreux et est surtout applicable à de très petits échantillons qui ne sont pas forcément de la taille du volume élémentaire représentatif (VER).

C. Analyse par ultrasons

La technique d'analyse par ultrasons est très utilisée dans le milieu industriel car c'est une technique de caractérisation non destructive qui permet d'analyser la totalité d'une pièce et d'évaluer la quantité de défauts de porosité en un temps assez raisonnable.

Cette technique se base sur le fait que la présence de pores dans un matériau va en général perturber la propagation des ondes ultrasonores [43]. En comparant l'amplitude du signal d'entrée et du signal de sortie, la quantité de pores au sein de l'échantillon peut être estimée [27]. La figure 16 représente le graphe des séries successives de C-Scan, avec F, D et B les réponses respectives données par la réflexion de l'onde sur la surface, l'intérieur et le fond de la pièce. Ce procédé d'analyse repose sur la comparaison de l'atténuation du signal ultrasonore mesurée sur l'échantillon par rapport à l'atténuation mesurée sur des éprouvettes étalons. Le taux volumique de pores et leur répartition au sein de la pièce peuvent être estimés. Cependant cela reste une estimation et non une mesure précise du taux de porosité.