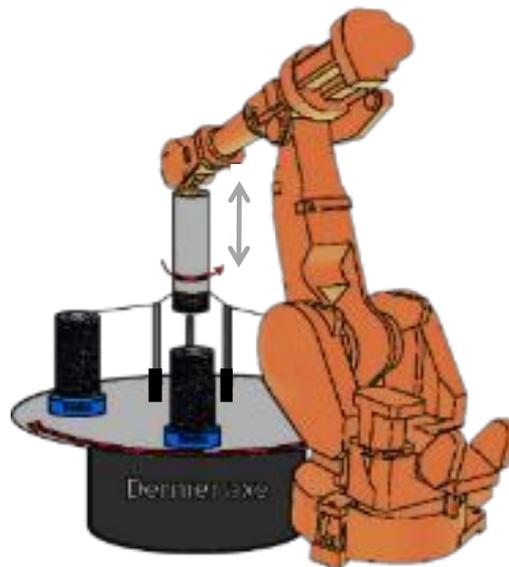


# Paramètres de consolidation

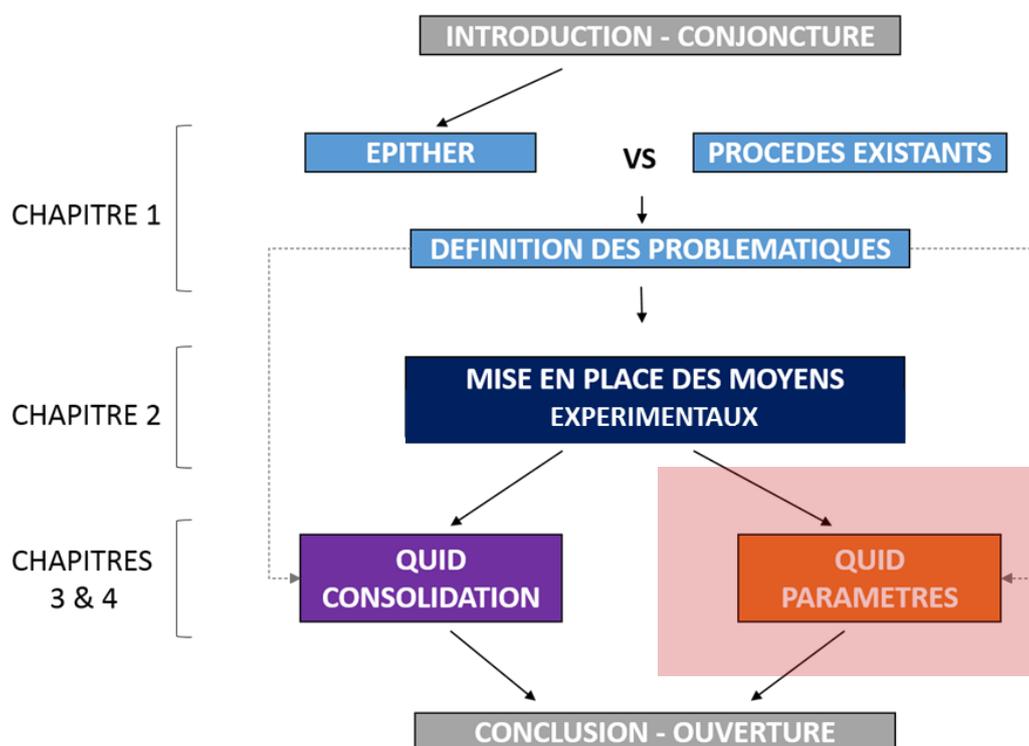
## MISE EN SITUATION :

L'objectif de ce chapitre est d'appréhender un ensemble de paramètres de mise en forme appelés paramètres extrinsèques. Cela permet de définir les paramètres de mise en forme les plus influents du procédé, de mettre en avant les défauts liés à certaines configurations de mise en forme.



## SOMMAIRE

SOMMAIRE	143
I - INTRODUCTION	145
II - PARAMETRES EXTRINSEQUES	146
II) 1 - <i>Introduction des problématiques</i>	147
II) 2 - <i>Exercice de corrélation des paramètres</i>	148
II) 2) 1 - Interaction : exemple du taux d'homogénéité	149
II) 2) 2 - Interaction : exemple de la tenue mécanique	150
II) 3 - <i>Mise en évidence des paramètres de la consolidation</i>	150
III - PLAN D'EXPERIENCE	151
III) 1 - <i>Mise en place du plan d'expérience</i>	151
III) 2 - <i>Réalisation de l'ensemble du plan d'expérience</i>	154
III) 2) 1 - Présentation du plan d'expérience	155
III) 2) 2 - Présentation des pièces	156
III) 3 - <i>Evaluation des mises en forme</i>	157
III) 3) 1 - Evaluation préalable des écarts sur les densités	158
III) 3) 2 - Evaluation mécanique	159
III) 3) 3 - Evaluation de la santé matière	165
III) 4 - <i>Conclusion sur l'ensemble des mises en forme</i>	168
IV - VERS DES MORPHOLOGIES PLUS COMPLEXES	169
IV) 1 - <i>Explication de la problématique</i>	169
IV) 2 - <i>Nervures et rainures</i>	169
IV) 3 - <i>Traceurs rhéologiques</i>	170
IV) 3) 1 - Etat de l'art	170
IV) 3) 2 - Simulation sous Forge	172
IV) 3) 3 - Suivi de la mise en forme par insertion de traceurs	174
IV) 4 - <i>Perspectives industrielles</i>	175
V - CONCLUSION	176
VI - LISTE DES FIGURES ET BIBLIOGRAPHIE	177



## I - Introduction

La thermocompression d'enroulements, permettant la réalisation de pièces TOR, doit être cadrée par l'optimisation des paramètres de mise en forme. Cette optimisation se réalise sur un certain nombre de paramètres dit extrinsèques au procédé. Ces paramètres sont présentés dans la partie suivante.

L'optimisation de la mise en forme passe par la mise en place d'un plan d'expérience permettant l'évaluation de l'influence des différents paramètres étudiés et le choix de l'optimale de ces derniers. Par exemple, cette évaluation fournit des tendances permettant de qualifier la sensibilité de la mise en forme à la température ou à la pression exercée lors de la consolidation.

L'amélioration des propriétés mécaniques est réalisée par une amélioration de l'imprégnation (taux de porosité très bas, structure homogène), mais aussi avec des apports de caractéristiques morphologiques spécifiques. C'est par exemple le cas d'une remontée de nervure ou d'un rainurage permettant une amélioration mécanique spécifique à certains cas de chargements en modifiant le moment quadratique de la pièce tout en limitant, voir en réduisant, l'augmentation de la masse. C'est par exemple le cas des IPN dans le bâtiment, destinés à apporter une résistance accrue aux cas de chargements en flexion.

La réalisation de mises en forme spécifiques a été testée par le changement morphologique des pièces ; ces dernières ont été obtenues via la mise en place d'inserts dans le moule TOR permettant ainsi l'apport de caractéristiques mécaniques spécifiques. L'objectif de cette partie est d'évaluer la santé matière à la suite de ce type de mises en forme engendrant des écoulements de la matière spécifique, radiaux, associés à ces morphologies.

Dans un dernier temps, une ouverture industrielle est proposée par un exemple de simulations, visant à la prédiction du comportement du composite lors de sa mise en forme. Plusieurs possibilités sont présentées, allant de la simulation toron par toron, à une simulation avec un matériau homogène.

## II - Paramètres extrinsèques

La maîtrise du procédé de fabrication commence par l'identification de l'ensemble des paramètres régissant la mise en forme. La figure 1, ci-dessous, présente une identification des paramètres des deux étapes de mise en forme :

- d'enroulement permettant d'obtenir une préforme, préchauffée ou non,,
- de forgeage permettant de réaliser une pièce forgée à forte propriétés morphologiques.

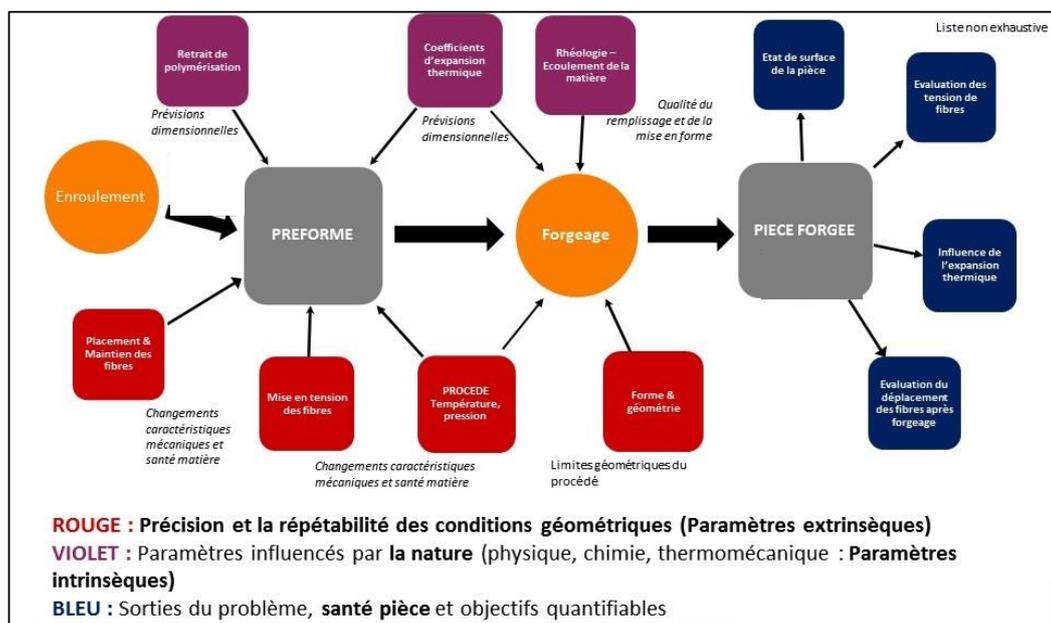


Figure 1 : Ensemble des paramètres de mise en forme

L'ensemble de ces paramètres peuvent être classés de la façon suivante :

- Les entrées du procédé :
  - **Les paramètres intrinsèques :** ce sont des paramètres dépendant de la matière utilisée comme par exemple du retrait de polymérisation (ce cas n'est plus présent dans notre étude) ou la rhéologie spécifique à la matière utilisée (comportement et viscosité du thermoplastique à température de fusion).
  - **Les paramètres extrinsèques :** ce sont des paramètres dépendant de l'opérateur tels que la tension appliquée lors de l'enroulement, la température et la pression de mise en forme ou bien même le placement initial des fibres.

- Les sorties du procédé : ce sont les paramètres évaluables à la suite de la mise en forme, comme l'état de surface de la pièce, le suage de résine, l'évaluation du déplacement des fibres via la mise en place de marqueurs rhéologiques.

Il s'agit ici d'une liste non exhaustive des entrées et sorties du procédé, qui doivent être maîtrisées pour une meilleure compréhension de l'ensemble des étapes de fabrication.

Les paramètres cités, ainsi que d'autres évalués, sont les entrées du plan d'expérience, un des points abordé par ce chapitre.

## II) 1 - Introduction des problématiques

L'objectif de ce chapitre est d'avoir une première approche de l'influence des paramètres de mise en forme sur le résultat de mise en forme. Chaque variable « produit » dépend d'un certain nombre de phénomènes physiques issus des paramètres opératoires.

La définition de paramètres à étudier est la première étape de réalisation d'un plan d'expérience. Afin d'identifier les différents paramètres intervenant dans le procédé de fabrication, il est proposé de réaliser une analyse complète du procédé de mise en forme, en allant des conditions opératoires de chaque étape dans la gamme de mise en forme jusqu'aux variables produits et aux moyens permettant de les contrôler.

La description du procédé de mise en forme complet a été réalisée dans les premiers chapitres, sans la nécessité de formaliser l'ensemble des données sous forme de diagramme.

A partir des travaux de Zakaria Allam (Allam, 2015.), un diagramme du procédé a été réalisé. La figure 2, ci-dessous, représente ainsi une vision du procédé de fabrication identifié dans la mise en forme des pièces par le procédé de fabrication connexe à cette étude.

Chaque étape de fabrication est représentée à travers les différents états de produits, obtenus avec des conditions opératoires propres. Le diagramme, ci-dessous, représente aussi les moyens de contrôle de certains paramètres produits et l'ensemble des états successifs de la pièce à travers le procédé de mise en forme (fibre, semi-produits et préformes, pièce forgée).

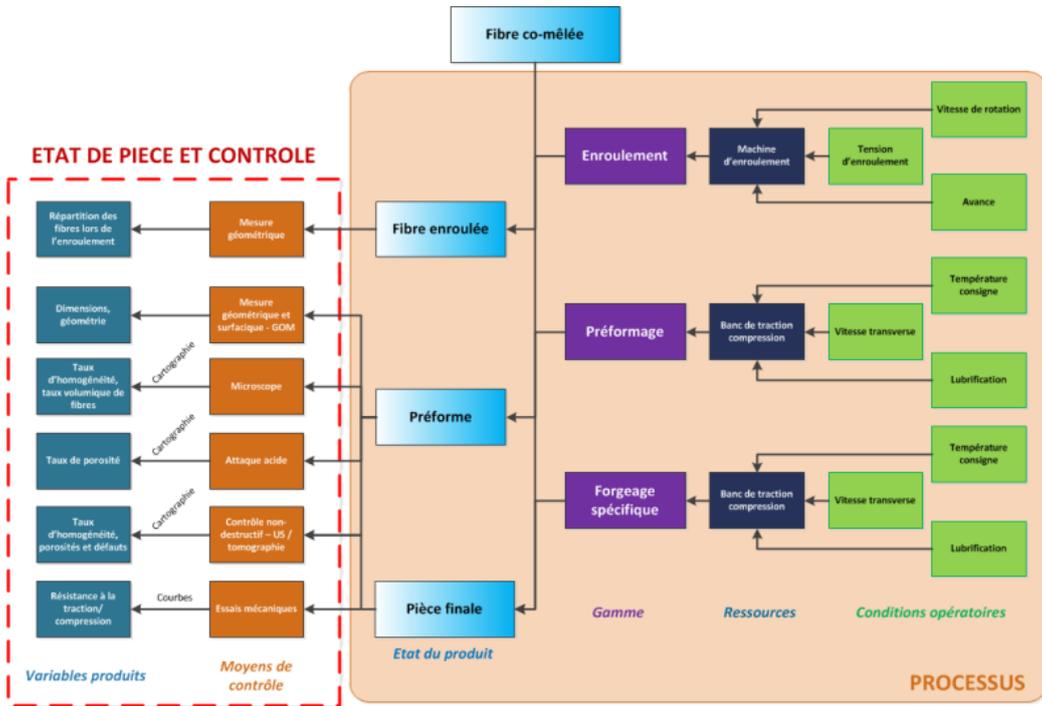


Figure 2 : diagramme processus & variables produits

## II) 2 - Exercice de corrélation des paramètres

L'objectif de cette partie est de proposer 2 exemples de corrélation entre paramètres procédés et variables produits. La corrélation entre ces paramètres permet de bien mettre en avant les phénomènes physiques en jeu dans la mise en forme afin d'avoir une image plus globale des paramètres process à prendre en compte dans le plan d'expérience TAGUCHI et les couplages existants entre les différents paramètres.

Les variables produits sont repris dans la figure 2 présentée précédemment.

Dans un premier temps, il est proposé d'étudier le taux d'homogénéité du composite de la pièce à l'issue de la mise en forme. Ce taux d'homogénéité est défini dans cette étude comme un terme global définissant les répartitions de taux volumiques de fibres, les taux de porosités et leurs gradients à l'intérieur de la pièce composite.

Dans un second temps, il est proposé d'étudier la variable produit « tenue mécanique ».

## II) 2) 1 - Interaction : exemple du taux d'homogénéité

La figure 3, reprend le cheminement de paramètres process à la variable produit « taux volumique de fibres ». Certains paramètres sont gérables directement par l'utilisateur, comme les températures consigne de l'outillage. Le paramètre procédé comme la viscosité est quant à lui indirectement réglable, par les pressions et vitesse de mise en forme.

Cette représentation de l'ensemble de ces paramètres donne ainsi une vue globale de ce qui est nécessaire de gérer lors des mises en forme de TOR, comme ceux fixés et difficilement réglables tel que l'état de surface de l'outillage obtenu lors de l'usinage des cylindres.

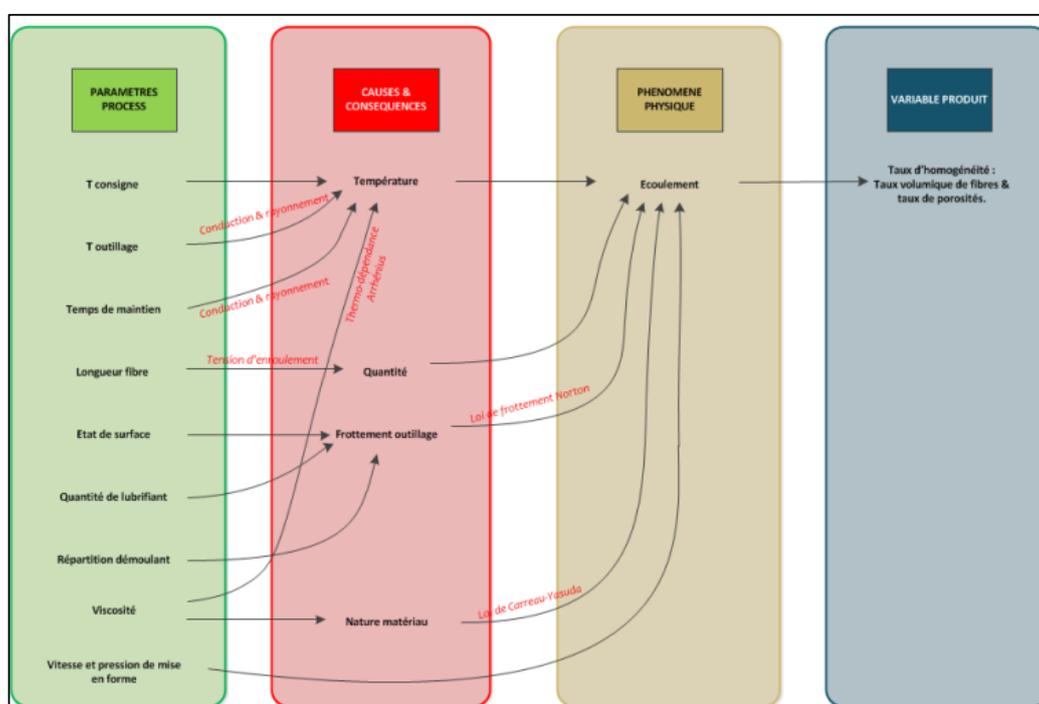


Figure 3 : Corrélation paramètres process et taux volumique de fibres

Le taux volumique de fibres par rapport au taux de porosités est une variable de l'écoulement, géré dans la mise en forme par les paramètres suivants :

- T consignes (en °C)
- Temps de maintien (en minutes)
- Vitesse et pression de mise en forme (respectivement en mm/s et en bar)
- La longueur de fibres pouvant être variée ponctuellement. (en cm)

## II) 2) - Interaction : exemple de la tenue mécanique

L'exercice de corrélation des interactions entre paramètres procédés et variables produits se montre parfois plus complexe. C'est ainsi que la variable produit « tenue mécanique » est fonction d'un nombre plus important de paramètres dont les interactions sont parfois difficilement identifiables. La tenue mécanique est fonction directe de la santé matière, et donc de la variable produit vue précédemment : taux volumique de fibres.

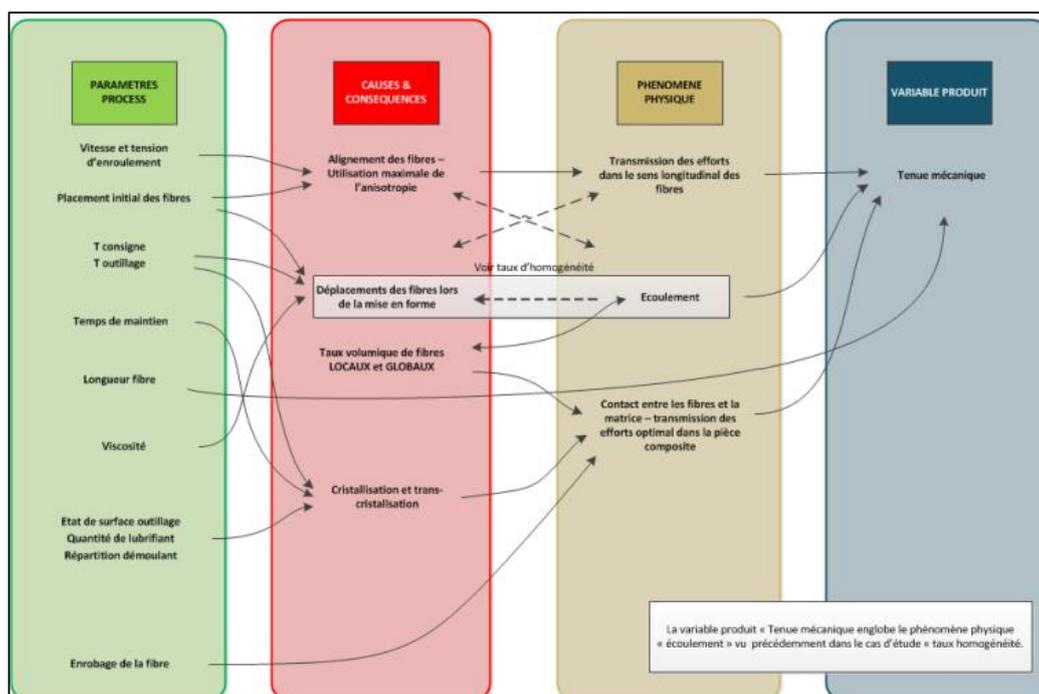


Figure 4 : Corrélation paramètres process et tenue mécanique

La tenue mécanique est aussi variable des déplacements de matière lors de la mise en forme, des alignements de fibres (résistances mécaniques maximales en traction dans le sens des fibres) et des conditions thermocompressions.

## II) 3 - Mise en évidence des paramètres de la consolidation

L'exercice de corrélation des paramètres de mise en forme a permis de mettre en avant un certain nombre de paramètres influents. Les conditions de consolidation comme la température, le temps de maintien ou la vitesse de mise en forme sont de première importance. D'autres paramètres auront, à priori, une influence non négligeable sur la santé matière et les caractéristiques mécaniques des TOR consolidés comme par exemple la tension d'enroulement. Le plan d'expérience à définir dans la suite de cette étude est donc directement issu de ces exercices de corrélations, ainsi que des premiers TOR réalisés, marquant des tendances et influences.

### III - Plan d'expérience

Afin de mettre en avant des tendances lors de l'étude du procédé de mise en forme, un plan d'expérience a été défini. Celui-ci doit permettre de mettre en exergue l'influence de différents paramètres de mise en forme comme la température, la pression ou la tension d'enroulement utilisée. Afin de ne pas réaliser un nombre considérable de mises en forme, difficilement analysables, il a été décidé de réaliser un plan d'expérience à X paramètres. L'ensemble du plan d'expérience doit permettre l'analyse de l'influence de paramètres lors d'essais mécaniques, micrographies ou simplement mesures des contraintes internes.

#### III) 1 - Mise en place du plan d'expérience

Dans un premier temps, et avant la définition du plan d'expérience complet, l'ensemble des paramètres, qu'il est possible d'étudier, ont été listés et classés afin d'en déterminer les prioritaires. Ces paramètres sont présents dans le tableau 1, ci-dessous. Certains paramètres sont parfois limités aux capacités des moyens de mise en forme ou jugés comme trop peu influents pour être considérés dans le plan d'expérience, au regard des essais préliminaires réalisés.

Tableau 1 : Classification des paramètres de mise en forme (enroulement et consolidation)

Paramètres:	Utilisé ?	Influence	Infos complémentaires
HAUTEUR D'ENROULEMENT	NON	Elle fera varier la hauteur finale en fonction de la tension	Fixé 30mm
TENSION D'ENROULEMENT	OUI	Hauteur finale, santé matière de la pièce	3 valeurs, limitées par la tête d'enroulement
NOMBRE D'ENROULEMENT	OUI	Cote extérieure de la pièce, mouvements de fibres sur l'extérieur de la pièce	2 valeurs, calées via les essais préliminaires
NOMBRE DE SPIRES	NON	Dépend de la hauteur d'enroulement	Fixé 27 spires
EFFORT DE MISE EN FORME	OUI	Santé matière de la pièce	3 valeurs, limitées par la machine de compression
TEMPERATURE DE MISE EN FORME	OUI	Santé matière de la pièce	3 valeurs, limitées par le système de chauffe
VITESSE DE CHAUFFE	NON		Limitée par le système de chauffe
VITESSE DE REFROIDISSEMENT	NON	Santé matière de la pièce	Pas de maîtrise claire
MASSE	NON		Elle est fonction du nombre d'enroulement à une tension d'enroulement donnée
VITESSE DE MISE EN FORME	OUI	Cadences et santé matière	3 valeurs, limitées par la machine de compression
TEMPS DE MAINTIEN DE CHAUFFE	OUI	Cadences et santé matière	Faire attention à l'inertie thermique

La hauteur d'enroulement est fixée pour l'ensemble des essais à 30 mm. Cette hauteur d'enroulement fait varier la hauteur finale de la pièce en fonction de la tension d'enroulement. Arbitrairement, afin de ne pas changer le programme sur le robot, cette hauteur a été laissée fixe lors de tous les essais.

- La tension d'enroulement, quant à elle, a une influence sur la santé matière de la pièce. Cette tension d'enroulement est limitée par la tête d'enroulement réalisée en impression 3D et ne permet pas de tension d'enroulement supérieure à 50 newtons. La tension d'enroulement détermine aussi la hauteur finale de la pièce et la quantité de matière enroulée pour un nombre de passes données.
- Le nombre de passes d'enroulement détermine la cote extérieure finale de la pièce. Si le nombre de passes est insuffisant il y aura suage de matière thermoplastique vers l'extérieur de la pièce. Si le nombre de passes est trop grand il y a un mouvement des fibres lors de la mise en forme vers l'extérieur de la pièce. C'est en se servant de l'abaque d'enroulement, qu'un couple « tension d'enroulement / nombre de passes » est déterminé.
- Le nombre de spires dépend de la hauteur d'enroulement et n'est pas modifiable. Sur une hauteur de 30 mm 27 spires peuvent être enroulées.
- L'effort de mise en forme est limité par le banc de compression utilisé. Un banc de compression de 30 Knewton, Lloyd LR30K, a été utilisé pour l'ensemble des essais de mise en forme. Suite à une première série d'expériences, il a été déterminé qu'un effort de mise en forme supérieure à 15 kN est totalement inutile. Dans les cas de tensions supérieures, aucun changement n'est observable que ce soit par la micrographie, par l'évaluation des contraintes résiduelles ou par l'aspect général de la pièce. Aucune différence d'imprégnation n'est observée.
- La température de mise en forme est dépendante du thermoplastique utilisé dans le composite. Il s'agit ici d'un PPS qui a une température de fusion de 286 °C. Cette température de fusion est nécessaire pour la mise en forme des pièces composites et la dégradation du thermoplastique intervient vers 320 °C. Au-delà de cette température le thermoplastique se dégrade et ne fait plus office de lien dans la transmission des efforts pour la pièce composite. La température de 315 °C a été choisie comme limite pour les mises en forme.
- La vitesse de chauffe est limitée par l'ensemble du système de chauffage utilisé dans cette expérience. Elle est limitée à la quantité d'énergie que peuvent transmettre les colliers chauffants et les plateaux chauffants. La vitesse de chauffe n'est donc pas un paramètre extrinsèque gérable dans cette manipulation.

- La vitesse de refroidissement a une influence capitale dans la santé matière des pièces par la cristallisation du thermoplastique. Une vitesse de refroidissement créant un fort gradient de température dans la pièce permettra la création d'un fort gradient de recristallisation, et donc des contraintes internes non nulles. Cependant, la manipulation ne permet que deux modes de refroidissement ; le premier mode de refroidissement est matérialisé par une convection forcée, limitée par la pression du réseau pneumatique. Le second mode de refroidissement est simplement de laisser l'ensemble du moule se refroidir ambiant. Ces deux cas d'études ont été pris en compte à la fin du plan d'expérience. Pour les principaux essais de mise en forme la matrice était refroidie avec de l'air pulsé.
- La masse enroulée dépend de la tension d'enroulement, de la hauteur d'enroulement et du nombre de passes.
- La vitesse de mise en forme est limitée par la machine de compression et peut varier de quelques millimètres par minute à environ 250 mm/m.
- Le temps de maintien de chauffe permet la bonne homogénéité de la journée du composite lors de la mise en forme et varie ici entre zéro minute, ce qui correspond à une cadence maximale, à 15 minutes.

### III) 2 - Réalisation de l'ensemble du plan d'expérience

Le tableau ci-dessous représente l'ensemble des pièces réalisées dans la cadre des chapitres 3 et 4.

Numéro de pièce	Date	ENROULEMENT								MISE EN FORME					
		Renfort	Matrice	Type de matière	Masse totale (g)	Pression de contact (bars) / Effort (N)	Température (°C)	Hauteur (mm)	Taux volumique de fibres (%)	Mise en forme	Pression de mise en forme (bars)	Température de forgeage (°C)	Cote après forgeage (mm)	Masse après forgeage (g)	Essai traction (T)
1		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
2		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
3		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
4		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
5		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
6		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	>30	300	30	45	oui					
7		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
8		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
9		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
10		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	0,7	300	30	45	oui					
11		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	40	>30	300	30	45	oui					
12		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
13		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
14		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
15		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
16		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
17		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
18		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
19		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
20		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
21		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
22		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
23		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
24		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
25		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
26		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
27		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	36	0,7	300	30	45	oui					
28		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles						oui					
29		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles						oui					
30		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles						oui					
31		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles						oui					
32		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles						oui					
33		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles						oui					
34		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles						oui					
35		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles						oui					
36	06/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	500	285 °C	15,118	44,15		
37	06/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	5000	300 °C	14,537	43,25		
38	06/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	15000	315 °C	14,541	43,35		
39	23/03/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	500	300 °C	16,91	42,55		
40	23/03/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	5000	315 °C	14,929	42,45		
41	05/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	15000	285 °C	14,232	42,5		
42	21/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	5000	285 °C	17,115	42,45		
43	21/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	15000	300 °C	15,352	42,45		
44	21/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	500	315 °C	18,168	45,95		
45	06/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	15000	315 °C	15,844	47,15		
46	07/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	500	285 °C	16,262	47,75		
47	12/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	5000	300 °C	16,059	47,65		
48	04/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	5000	315 °C	15,445	45,95		
49	05/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	5000	285 °C	15,211	45,35		
50	21/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	5000	300 °C	16,276	45,65		
51	21/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	5000	315 °C	15,421	45,8		
52	20/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	500	315 °C	17,89	45,3		
53	22/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	5000	285 °C	17,028	45,7		
54	18/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	500	285 °C	14,789	43,45		
55	25/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	5000	300 °C	14,671	43,35		
56	27/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	15000	315 °C	14,721	43,55		
57	29/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	500	300 °C	17,147	42,7		
58	28/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	5000	315 °C	14,958	42,5		
59	28/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	15000	285 °C	14,274	42,3		
60		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	5000	285 °C		42,45		
61		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	15000	300 °C		42,45		
62	22/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	500	315 °C	18,918	45,45		
63	27/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	15000	315 °C	15,865	47,35		
64	27/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	500	285 °C	16,061	47,45		
65	28/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	5000	300 °C	15,89	47,15		
66	29/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	5000	315 °C	15,449	45,9		
67	29/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	15000	285 °C	15,107	45,3		
68	29/04/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	500	300 °C	16,336	45,95		
69	02/05/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	300 °C	30	45	oui	15000	300 °C	15,175	45,45		
70	02/05/2016	Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	315 °C	30	45	oui	500	315 °C	17,434	45,25		
71		Carbone	PPS	Fibres co-mélangées industrielles	0	285 °C	30	45	oui	5000	285 °C		45,7		

TOR

Essais préliminaires

Essais interrompus

PLAN D'EXPERIENCE TAGUCHI

## III) 2) 1 - Présentation du plan d'expérience

Le plan d'expérience a été défini en 18 expériences de mise en forme. Dans un souci de répétabilité, ce plan d'expérience a été doublé. Chacune des pièces possède ainsi des caractéristiques de mise en forme propre, et sa pièce jumelle est réalisée dans les mêmes conditions. L'ensemble des paramètres sont présentés dans la figure 5, ci-dessous.

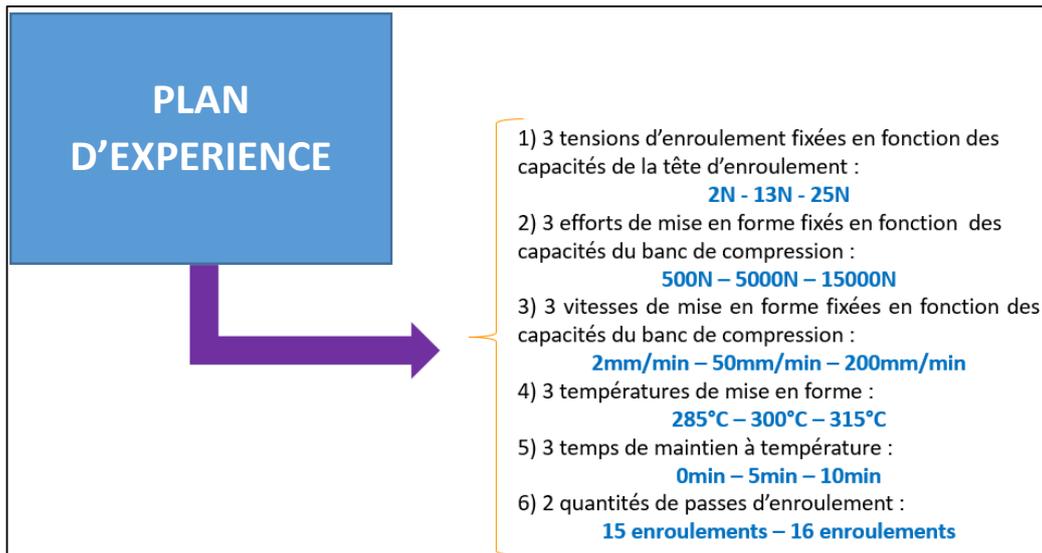


Figure 5 : Ensemble des paramètres de mise en forme utilisés

Deux nombres de passes d'enroulement doivent être testés. Pour 15 enroulements, la préforme obtenue glisse facilement dans le matrice de mise en forme de diamètre intérieur de 70mm. Pour 16 enroulements l'ajustement est plus serré et ne permet pas forcément des mises en forme à faibles tensions d'enroulements. La densité composite (à l'état de préforme) augmente avec la tension d'enroulement, comme montré dans le chapitre 2.

Il a ainsi été décidé de tester trois tensions d'enroulement, trois efforts de mise en forme, trois vitesses de mise en forme, trois températures, trois temps de maintien (paramètre restant très difficilement évaluable de par l'inertie thermique de l'ensemble de l'outillage) et deux quantités de passes d'enroulement afin de mettre en avant l'expansion ou non de la matière dans le cas d'un enroulement plus petit que le diamètre extérieur (70 mm) de la pièce finale.

Le programme d'enroulement optimisé a été présenté dans le chapitre X « mise en place des moyens expérimentaux ». La méthode est toujours la même ; seules les tensions d'enroulement et le nombre de passes varient selon le plan d'expérience. Tous les cylindres TOR obtenus n'ont sensiblement pas la même masse selon les paramètres d'enroulement. Tous les enroulements sont réalisés avec le même programme (sauf bien entendu le nombre de passes ; 15 et 16), peu importe la tension d'enroulement appliquée. L'ensemble des résultats mécaniques sont, dans ce cas, comparés à masse relative.

## III) 2) 2 - Présentation des pièces

L'ensemble des pièces réalisées selon le plan d'expérience sont présentées sur la figure 6 ci-dessous. 32 TOR ont été réalisés, en suivant les différentes conditions de mise en forme énoncées spécifiquement selon le plan d'expérience cité dans le paragraphe précédent. Le plan d'expérience propose la réalisation de 18 TOR mais pour vérifier la répétabilité de l'enroulement et la mise en forme de chacune de ces pièces, elles ont été doublées. Ma ligne mauve sur la figure 6 ci-dessous correspond au doublement du plan d'expérience ; chaque pièce dans la partie haute de la figure a une jumelle dans la partie basse.



Figure 6 : Ensemble des 32 pièces réalisées pour le plan d'expérience TAGUCHI

Les premières observations sur les pièces réalisées sont les suivantes :

- Les 18 premières pièces présentent les mêmes caractéristiques morphologiques que leurs jumelles (pièces 18 à 32) qui ont été réalisées à des dates différentes, avec les mêmes outillages, le même programme d'enroulement et les mêmes conditions de mise en forme. Cette première observation est importante pour la suite des analyses et des évaluations, car elle permet de valider la répétabilité de l'ensemble des moyens de mise en forme suivants ;
  - Robot et tête d'enroulement (validation de la répétabilité du moyen d'enroulement, écarts de tension peu impactant)
  - Moyens de mise en forme (validation de la répétabilité du moyen de mise en forme)
- Certaines pièces présentent des zones de délaminage en leur centre qui peut être dû au cycle de mise en forme (et plus particulièrement au temps de refroidissement) ou aux conditions d'enroulement.

### III) 3 - Evaluation des mises en forme

Les critères d'évaluation des cylindres TOR ont été présentés dans les différents chapitres de cette étude. Les sorties ont été détaillées au début du chapitre 5, stipulant deux états de pièces pour l'analyse : les pièces brutes sont mesurées et pesées, les pièces découpées sont micrographiées, mesurées et subissent un essai mécanique. L'ensemble de ces données de sorties sont présentées sur la figure 7 ci-dessous.

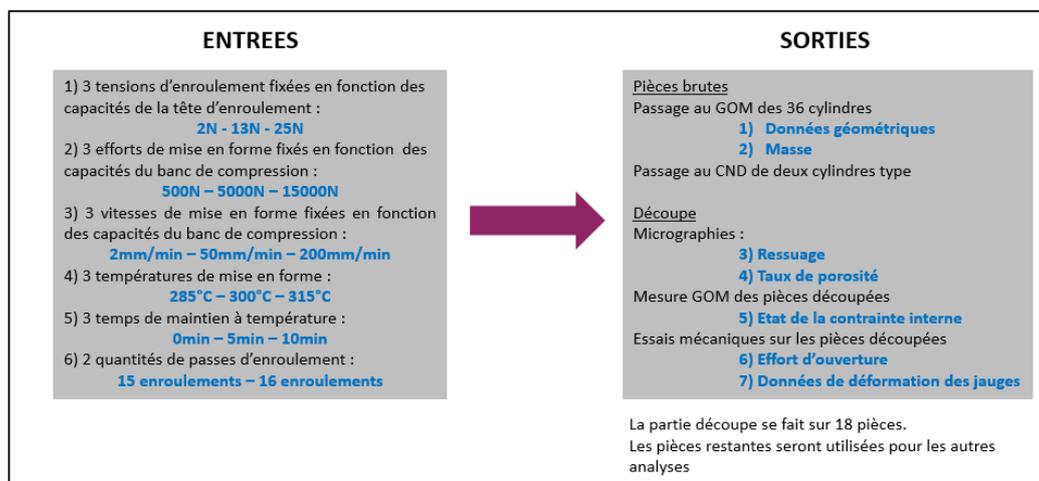


Figure 7 : Entrées et sorties du plan d'expérience

Une mesure avant découpe et une mesure après découpe doit être obligatoirement réalisée pour évaluer l'état de contrainte interne des pièces ; les diamètres intérieurs et extérieurs des pièces. Lors de premiers essais visant à calibrer le moyen de mise en forme, une pièce a été découpée, et lors de cette opération, le cylindre composite s'est resserré sur la tronçonneuse, mettant ainsi en avant un état de contrainte interne non négligeable ! Lors de cet essai, le cylindre s'est refermé de 0.6 mm sur le diamètre intérieur de 50 mm soit une déformation radiale de 1.2%. Cet état de contrainte interne est un phénomène lié à plusieurs paramètres dans le procédé. L'enroulement régulier de fibres, la tension appliquée lors de l'enroulement et le refroidissement du composite influent sur l'état de contrainte interne de la matière, et la réaction qui en découle lors de l'opération de découpe. L'étude de ce phénomène est présentée plus loin dans ce chapitre.

L'ensemble des paramètres de sorties n'ont pas été testés pour l'ensemble des cylindres réalisés. Comme précisé précédemment le plan d'expérience a été doublé pour une question d'évaluation des répétabilités dans le procédé de mise en forme. Les résultats de ces répétabilités ont été utilisés dans le chapitre 2, permettant de vérifier la validité de la partie expérimentale, et dans le point II.3.1 suivant.

Avant de commencer l'évaluation de l'influence de l'ensemble des paramètres de mise en forme, il est nécessaire d'évaluer les écarts de hauteur, de volume et de masse, pour définir la précision de l'ensemble du moyen de mise en forme.



- La masse des pièces : écart moyen de 0.54 %

Les écarts sur la masse sont très faibles entre deux pièces jumelles. Cela correspond aux restes de thermoplastique (petits films) venant combler les jeux de l'outillage lors des mises en forme à des températures plus élevées. Cet écart peut aussi provenir de la dernière coupe de la fibre lors de l'enroulement (+- 10 cm selon l'opérateur gérant l'enroulement).

### III) 3) 2 - Evaluation mécanique

Les caractéristiques mécaniques des pièces associées au procédé de mise en forme sont évaluées par une série d'essais de traction sur les cylindres. Ces essais ne sont pas normalisés mais sont cependant inspirés par un essai, issu des recherches bibliographiques, consistant à ouvrir un cylindre, bloqué entre deux pignes. Cet essai a été présenté dans le chapitre 2.

#### Modification de l'essai mécanique associé

Lors des premières découpes de TOR, comme expliqué précédemment, le cylindre se referme sur lui-même, bloquant systématiquement la lame. Pour rappel ce serrage correspond à un relâchement des contraintes internes du cylindre et est propre aux caractéristiques du procédé de mise en forme. Cette publication présente la mise en œuvre d'un essai mécanique permettant de caractériser la contrainte interne d'un cylindre, réalisé par un procédé d'enroulement filamentaire. La mesure des déformations est réalisée à l'aide de jauges de déformations placées stratégiquement sur la pièce. Des jauges de déformations ont tout d'abord été placées sur la pièce afin de réaliser un premier essai d'acquisition des déformations, comme présenté sur la figure 8 ci-dessous.

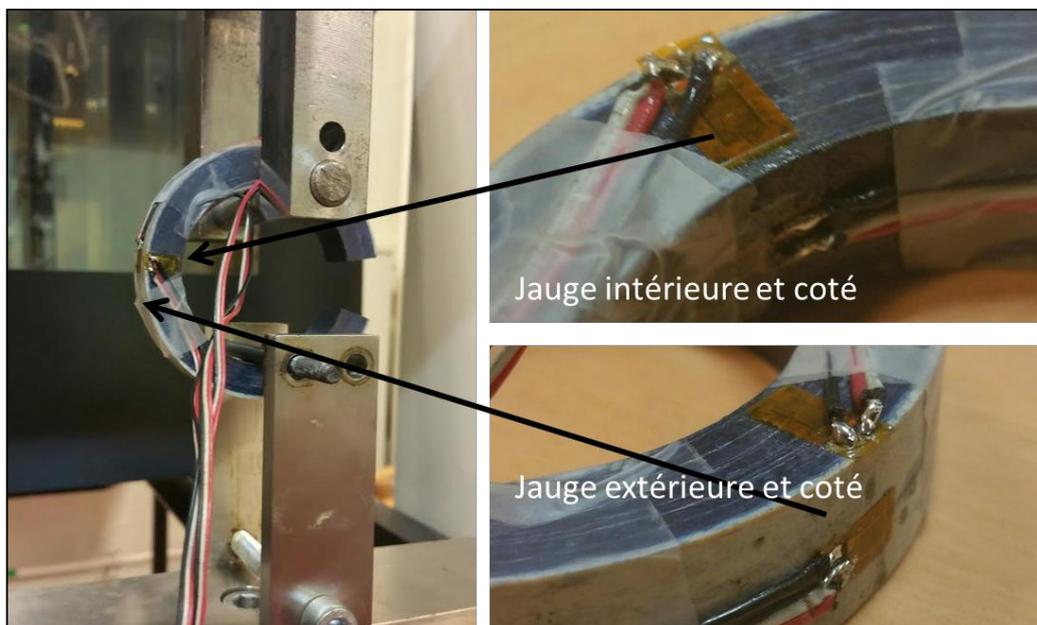


Figure 8 : Jauges de déformation placées sur la pièce

### Présentation du montage et de la méthode

Comme montré dans la figure 8, le placement des jauges de déformations a été testé dans cet essai de traction. Il présente l'avantage d'avoir un suivi direct des déformations avec une lecture de la jauge, via la carte d'acquisition, sans réaliser de traitement des données. Ces jauges de déformations unidirectionnelles peuvent être placées dans différentes configurations pour quantifier des déformations dans l'espace. Il présente cependant un certain nombre de désavantages :

- Les jauges de déformations sont collées directement sur le composite. La colle utilisée joue donc le rôle d'interface entre la jauge et la pièce.
- Les jauges de déformations sont parfois très délicates à installer (bornes à souder et jauges à coller) et c'est un travail minutieux ne convenant pas à l'analyse d'une série de 20 échantillons sur lesquels il serait intéressant de placer 2-3 jauges de déformations.
- Lors des délaminages du composite, les jauges se décollent et ne permettent pas de mesurer et donc d'analyser l'essai de traction en dehors de la zone élastique.

Pour réaliser l'essai de traction sur le TOR, il a également été choisi de réaliser des mesures par analyse d'images en suivant des points spécifiques sur la face avant de la pièce. L'essai et les mesures se déroulent selon les étapes successives présentées dans la figure 9 ci-dessous.

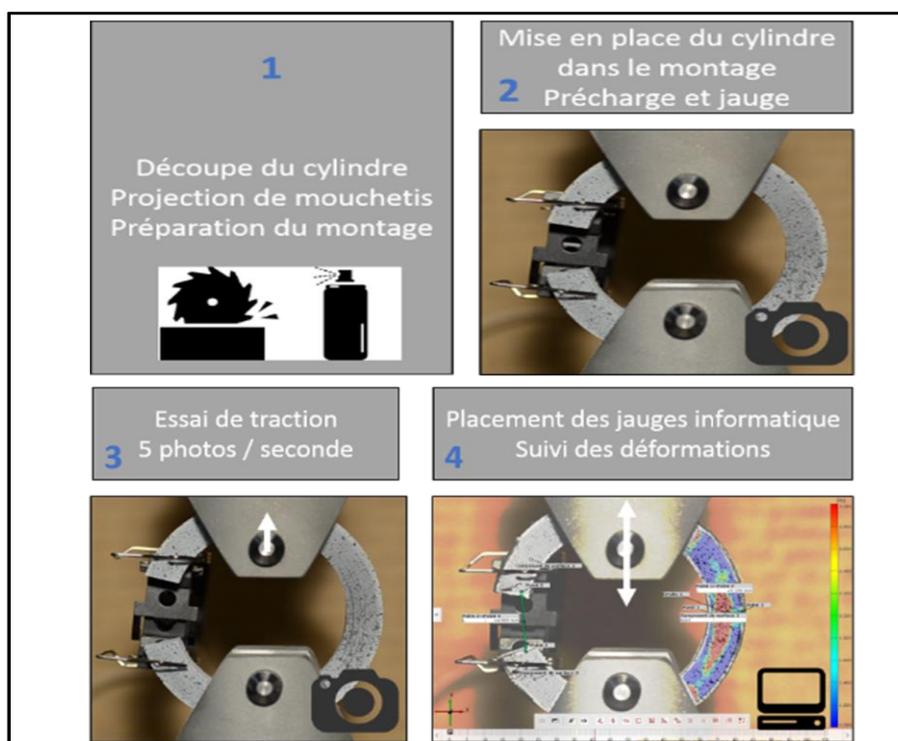


Figure 9 : Méthode de traction du cylindre coupé.

Voici les différentes étapes de l'essai et des mesures:

- Dans un premier temps, l'ensemble des cylindres sont mesurés par le système de stéréovision GOM. Cela permet de connaître les dimensions avant les essais de traction.
- Les pièces sont découpées et remesurées dans un second temps, afin de quantifier la contrainte interne, matérialisée par une fermeture du cylindre sur lui-même lors de la découpe.
- Un mouchetis, réalisé à base d'eau graphitée et de spray matifiant, permet le suivi du point lors des étapes suivantes. Le suivi du déplacement est réalisé avec un extensomètre.
- L'ensemble de l'essai de traction est photographié selon l'intervalle de temps choisi dans la définition du mode de mesure et de la précision recherchée.
- Les données vidéo sont traitées, dans un dernier temps, par le software GOM Correlate, permettant le placement de jauges de déformations virtuelles tout au long de l'essai. Les données de déformations sont directement corrélées avec les données issues du banc de traction/compression (couple effort/déplacement).

#### Identification des phases de déformation du TOR

L'essai de déformation d'une pièce TOR est réalisé sur banc de traction-compression à l'aide d'un outillage spécifique réalisé pour cette étude. Le cylindre, découpé ou non, est mis en position entre deux piges, en acier de diamètre 10mm, qui en s'éloignant vont contraindre le cylindre à s'ouvrir lors de l'essai de traction.

Cet essai peut être réalisé selon différentes configurations :

- **La première** correspondant à l'identification de la déformation élastique seule du cylindre. Cet essai permet de quantifier uniquement le domaine élastique de la pièce, et reste parfois difficilement réalisable car la frontière entre déformation élastique et déformation plastique/délaminage peut être floue.
- **La seconde** (correspondant à la figure 9) correspond à la réalisation d'un essai de traction complet lors d'un cycle de chargement jusqu'à délaminage de la pièce.

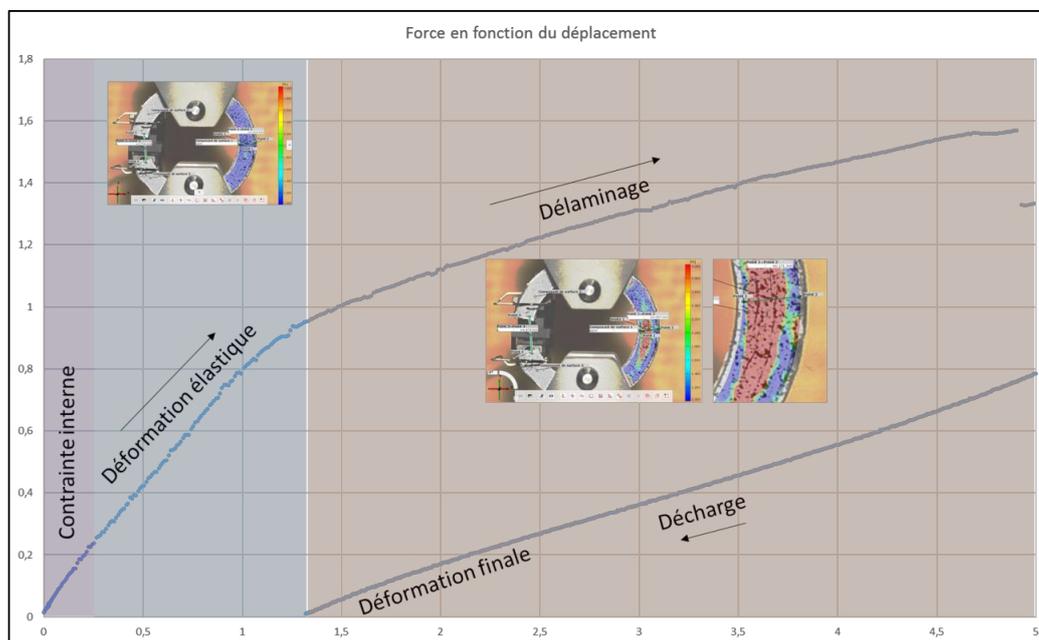


Figure 10: Essai de déformation d'un cylindre jusqu'à délamination.

Pendant ces essais de caractérisation mécanique plusieurs étapes sont identifiées (correspondant à un essai de flexion complexe ; la partie du diamètre intérieur en traction et partie du diamètre extérieur en compression.)

L'essai mécanique débute par une déformation élastique pure du matériau (dans cette zone est identifié l'état de contrainte interne du composite, qui correspond au phénomène de serrage cité précédemment). Cette déformation est suivie des premiers signes de délamination, correspondant à une déformation définitive du matériau par la décohésion de couches composites. Ceci est visible dans l'illustration 10 ci-dessus et représenté par la zone orange. Finalement, l'essai se termine par une décharge du composite.

Le matériau ne revient pas à son état initial, mais à l'état à partir duquel le délamination apparaît. L'essai mécanique est piloté par le déplacement relevé par l'extensomètre.

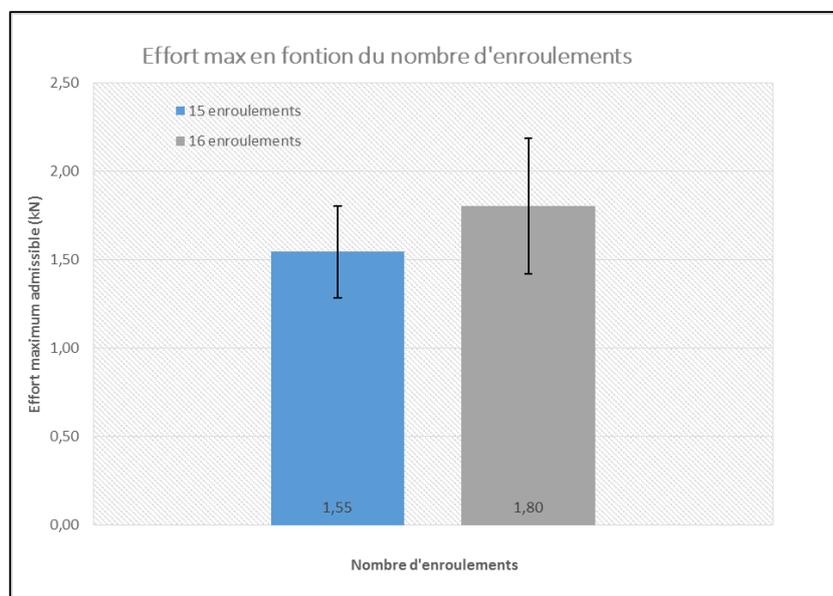
### Résultats des essais mécaniques

Les essais mécaniques ont été réalisés sur les 18 TOR découpés afin de caractériser mécaniquement les cylindres TOR.

### Influence du nombre d'enroulement

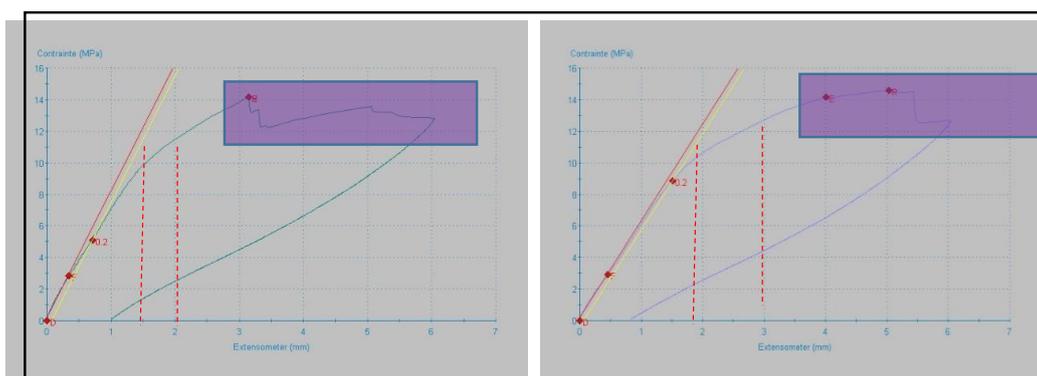
Le nombre d'enroulement a une influence capitale dans la tenue mécanique des pièces composites, car il définit non seulement la section du composite sollicité, mais aussi la qualité du remplissage de cette section. Le graphique 1, ci-dessous, présente l'effort maximum

admissible par le composite. Cet effort correspondant à la valeur maximale obtenue lors de différents essais de traction réalisés.



Graphique 1 : Effort maximum en fonction du nombre d'enroulement

L'effort maximum admissible est choisi comme paramètre d'analyse (sortie du plan d'expérience) pour la caractérisation mécanique du composite par un souci de simplification. Il est également possible par ailleurs de prendre différentes valeurs mesurables, comme la zone délimitant la déformation élastique de la déformation plastique. Cette valeur est parfois difficilement quantifiable, comme il est possible de le constater sur les graphiques ci-dessous (traits rouges).



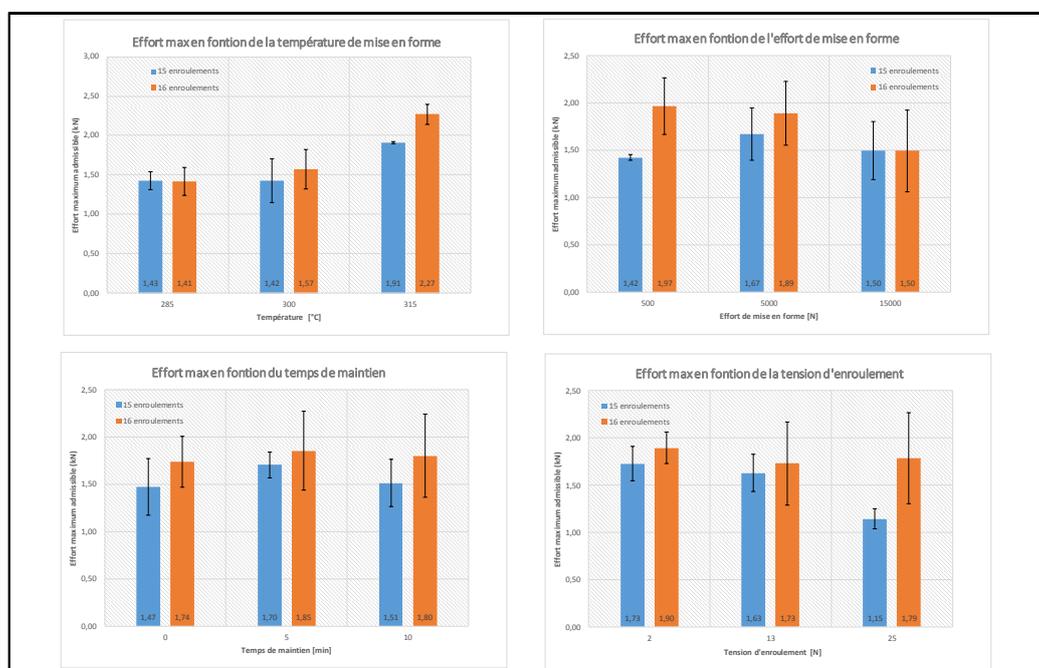
Graphique 2 : Essai de traction 43 (à gauche) et 44 (à droite). Deux mises en forme différentes

Dans le cas des essais de traction sur cylindre TOR, la reprise des efforts après déformation plastique marque une caractéristique intéressante du composite ; la tenue des efforts après délaminage partiel de la pièce. Ce phénomène peut être identifié dans les deux graphiques précédents (zones en mauve)

### Résultats mécaniques généraux

Une partie des résultats mécaniques a été traitée et illustrée dans la série de graphiques ci-dessous, reprenant respectivement l'effort maximum en fonction de :

- La température de mise en forme.
- L'effort de mise en forme.
- Le temps de maintien.
- La tension d'enroulement.



Graphique 3 : Analyse mécanique des pièces TOR

La température de mise en forme présente une influence marquée dans les résultats des essais mécaniques, augmentant ainsi d'environ 25% la contrainte maximale admissible. Les autres paramètres, comme l'effort de mise en forme ou le temps de maintien, ne présentent pas de tendance franche et sont difficilement interprétables. La tension d'enroulement, quant à elle, pourrait avoir une influence au niveau de la santé matière du composite ; en effet les essais à tension d'enroulement de 25 N présentent des caractéristiques mécaniques faibles avec un petit écart moyen, mais cette conclusion n'est pas valable pour des essais à 16

enroulements. Cette observation est consolidée par une caractérisation microscopique de l'imprégnation, dans la partie suivante.

Les efforts de mise en forme ne présentent pas de tendance franche dans l'amélioration de l'effort maximum admissible dans cet essai mécanique. Les résultats mécaniques ne permettent pas de donner un effort de mise en forme idéal, dans ce cas d'étude précis. Il peut cependant être noté qu'un effort de mise en forme de 500N suffit à réaliser une consolidation composite, dans le cas du TOR et de son outillage (l'effort de mise en forme est une donnée qui se montre un peu subjective, car elle dépend des efforts de frottements propres à l'outillage, de par son état de surface et sa lubrification).

L'inertie thermique de l'outillage et du composite n'a pas permis de donner une tendance franche sur le temps de maintien.

La température de mise en forme se présente comme le paramètre prédominant dans cette étude.

### III) 3) 3 - Evaluation de la santé matière

Lors de l'étude d'une nouvelle pièce à réaliser en composite, un cahier des charges est fourni par le client, en fonction du domaine d'utilisation de la pièce et de son environnement. L'essai mécanique, comme la traction du cylindre coupé, peut être une des exigences de ce cahier des charges qui stipule, par ailleurs, un état de santé matière type (et une fourchette permettant l'acceptabilité des pièces). Les éléments de caractérisation de la santé matière peuvent être par exemple le taux de porosité ( $0% < \text{Taux de porosité} < 2\%$ ), la répartition des fibres dans la matrice, etc. Dans le cadre de la réalisation de TOR, un certain nombre de défauts caractéristiques ont été identifiés. L'évaluation de ces critères ont permis de mettre en avant des défauts macroscopiques et microscopiques propres aux conditions de mise en forme.

#### Défauts macroscopiques caractéristiques

Ces défauts caractéristiques sont des critères de non acceptabilité des pièces, comme un mauvais remplissage ou la présence de porosités. Les défauts identifiés dans les mises en forme sont présentés dans le tableau 10 ci-dessous :

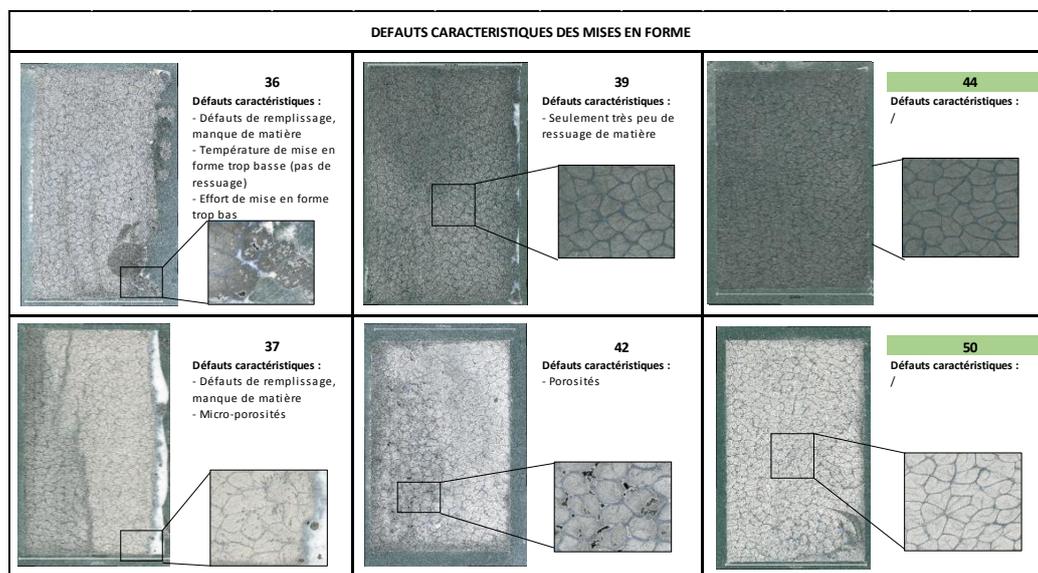


Figure 11 : Défauts caractéristiques des mises en forme TOR, et pièce acceptable

Les pièces 36-37-42 présentent 3 défauts caractéristiques de mauvaises conditions de mise en forme. La pièce 36 présente l'ensemble des défauts observables dans le cadre de la mise en forme composite TOR, applicable à toutes les mises en forme de fibres co-mêlées craquées de cette étude :

- un mauvais remplissage signifiant une absence de matière importante.
- des porosités intra-torons et inter-torons signifiant un mauvais couple effort/température de mise en forme.

L'absence de suage signifie, quant à elle, un couple effort/température insuffisant pour évacuer le thermoplastique vers l'extérieur de la pièce.

Les pièces 44 et 50 sont quant à elles acceptables d'un point de vue santé matière. Elles ne présentent pas de suage de thermoplastique, une bonne répartition de la matière à l'intérieur de la section, et des taux de porosités quasi-nuls (les prélèvements locaux ont montré des taux de porosités proches de 0%).

La pièce 39 est quant à elle une exception. Elle peut être qualifiée d'acceptable selon le critère « suage » de thermoplastique. Elle présente en effet quelques traces de PPS autour de son diamètre extérieur, tout en possédant un taux de porosité similaire à celui des pièces 44 et 50.

Ces observations ont permis de définir des critères d'acceptabilité présentés dans le paragraphe suivant, permettant une évaluation générale des mises en forme effectuées.

### Evaluation générale des mises en formes

L'ensemble des différents types de cylindres du plan d'expérience ont été découpés pour les essais mécaniques et les études micrographiques de qualification de la santé interne. Le tableau 2 ci-dessous reprend l'ensemble des données établies à partir des cylindres découpés.

Les colonnes 2 à 4 qualifient les découpes réalisées. Les critères sont les suivants : 0 signifie un NON franc du critère d'évaluation (exemple : pièce 36 ; ni suage ni remplissage). Le 1 signifie un OUI franc du critère d'évaluation (exemple : pièce 37 : présence de porosités)

Tableau 2 : Caractérisations des TOR

Numéro de pièce	Remplissage	Suage	Porosités	CND	ASPECT	SANTE MATIERE	EFFORT MAX [kN]
36	0	0	1	Pas acceptable	Pas acceptable	Manque de matière & température trop basse	1,394
37	0	1	1	Pas acceptable	Pas acceptable	Manque de matière	1,924
38	0	0	1	Pas acceptable	Pas acceptable	Manque de matière & température trop basse	1,655
39	1	0	0	Acceptable	Acceptable	Acceptable	2,394
40	1	1	0	Acceptable	Acceptable	Manque de matière	1,146
41	1	1	0	Acceptable	Acceptable	Manque de matière	1,568
42	1	0	1	Pas acceptable	Acceptable	Effort de mise en forme insuffisant & température trop basse	1,455
43	1	0	0	Acceptable	Acceptable	Acceptable	1,841
44	1	0	0	Acceptable	Acceptable	Acceptable	1,893
45	0	1	0	Acceptable	Pas acceptable	Manque de matière	1,252
46	0	1	0	Acceptable	Pas acceptable	Manque de matière	1,038
47	0	0	0	Acceptable	Pas acceptable	Manque de matière	2,145
48	1	0	0	Acceptable	Acceptable	Acceptable	2,145
49							1,68
50	1	0	0	Acceptable	Acceptable	Acceptable	1,863
51	1	1	0	Acceptable	Acceptable	Manque de matière	1,197
52	0	1	0	Acceptable	Pas acceptable	Manque de matière	2,395
53	0	1	0	Acceptable	Pas acceptable	Manque de matière	1,418

Les macrographies et micrographies sont qualifiées selon trois critères :

- Le premier critère est le remplissage. Ce critère est géométrique, il correspond au remplissage complet de la pièce composite dans le moule, sans zone non imprégnée/remplie en extérieur. Il s'agit à la fois d'un critère d'aspect et d'un critère géométrique. (pièces 44-50 de la figure 11, remplissage OK. Pièces 36 et 37, remplissage NOK)
- Le second critère est le suage de matière à l'extérieur de la pièce. Il correspond à un défaut de remplissage et d'imprégnation (pièce 37 de la figure 11, présence de suage de PPS) (il peut provenir d'un gradient de taux volumique de fibres, cf chapitre 4).
- Le troisième et dernier critère est la porosité. Il s'agit à la fois d'un critère macro et micro, vérifiant ou non la présence de porosités intertorons et intratorons.

La santé matière est définie comme acceptable, dans le cadre de cette étude, lorsque la pièce ne présente ni défaut de remplissage ou de suage de résine et ne présente aucune porosité apparente lors de la micrographie. C'est le cas des pièces 43-44 ou 50, qui sont définies comme acceptables selon les règles établies dans ce paragraphe. Ces pièces ont été réalisées avec des tensions d'enroulements assez basses et avec des températures supérieures à  $T=T_f+15^{\circ}\text{C}$ .

### III) 4 - Conclusion sur l'ensemble des mises en forme

Lors des essais mécaniques, outre le suivi des déformations par analyse de mouchetis, les zones de délaminages préférentiels sont visibles avant la déformation définitive (c'est-à-dire qu'un essai dans la zone élastique permet de définir les zones de délaminages préférentiels.) Cette caractéristique est intéressante d'un point de vue industriel, dans le cadre d'analyses de déformation sur des pièces en 2D. L'identification des zones de délaminages intervient dans le cas d'un essai de traction sur un cylindre plein (résistance dépassant la tonne avant casse complète du composite) comme dans le cas d'un cylindre découpé. La figure 12, ci-dessous, présente les deux cas cités et les zones de délaminages préférentiels sont définies en rouge par une déformation supérieure au seuil de déformation définitive du composite.

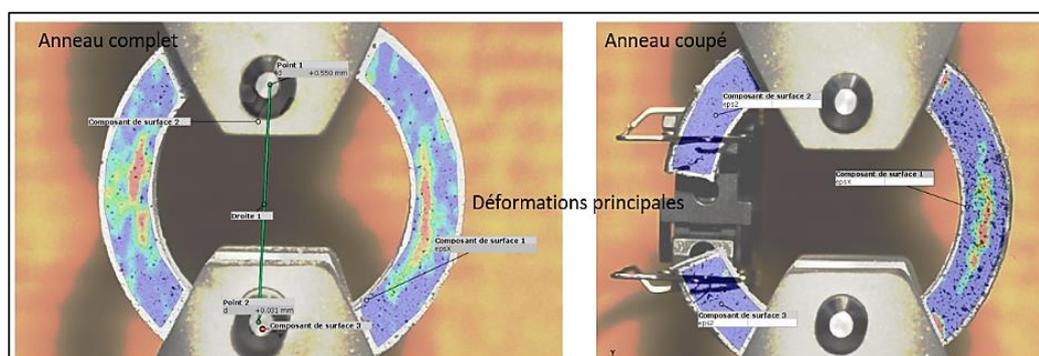


Figure 12 : Identification des zones de délaminages préférentiels (zones en rouges)

Le plan d'expérience défini dans ce chapitre a permis de mettre en avant des configurations de mises en forme avantageuses pour la réalisation de TOR, avec une fibre comblée craquée C-PPS. La température de mise en forme joue un rôle important dans la santé matière du composite et ainsi dans les caractéristiques mécaniques induites. Il apparaît que la tension d'enroulement peut être un frein au remplissage de la préforme à de hautes valeurs (dans cette étude : 13N).

La précision du moyen de mise en forme sur la gestion de certains paramètres comme la vitesse de refroidissement ne permet pas de conclure sur l'état de contrainte interne variable à la fois du chemin de mise en forme mais aussi du refroidissement. Cependant le plan d'expérience a permis de dégager certaines tendances intéressantes tout en assurant une certaine répétabilité dans les paramètres de mises en forme.

Cette expérience correspond à une étape de caractérisation préindustrielle peu coûteuse, permettant d'obtenir des pièces composites issues du procédé de fabrication étudié, avec plusieurs matières et plusieurs configurations. Il s'agit d'une première phase permettant de déterminer les paramètres clés, à gérer prioritairement dans le procédé de mise en forme. La corrélation entre santé matière, par les 3 caractéristiques remplissage/suage/porosités, et les caractéristiques mécaniques a été vérifiée par l'obtention d'un lot de 5 pièces définies comme « acceptables » (le remplissage total de la pièce, l'absence de porosités et de suages, caractéristiques mécaniques supérieures).

## IV - Vers des morphologies plus complexes

L'objectif de cette partie est de montrer une perspective industrielle utilisant les travaux de thèse avec la mise en forme des cylindres. Il est ainsi proposé de mettre en avant des mises en formes spécifiques de cylindres TOR, comme des remontés de nervures, permettant d'obtenir des structures de pièces plus complexes. Dans un premier temps, la problématique liée à ce type de mise en forme est explicitée, puis les mises en forme sont mises en avant.

### IV) 1 - Explication de la problématique

La réalisation d'un cylindre TOR peut être la première étape de fabrication de pièces de révolution avec des morphologies plus complexes. Le brevet, déposé en 2015, revendique la mise en forme de nervures à partir de pièces morphologiquement simples, appelées préformes. Dans le cas du TOR, trois mises en forme plus complexes ont été proposées, afin de correspondre au mieux au cas industriel, tout en utilisant des morphologies intéressantes dans le cadre de la recherche (comme illustré sur la figure 13).

### IV) 2 - Nervures et rainures

La première géométrie proposée correspond à la mise en forme d'une rainure. Cette rainure est réalisée dans le même moule de mise en forme, par la mise en place d'un insert. Une pièce préforme, pré-consolidée ou non, est placée dans le moule et subit la même mise en forme que le TOR classique.

D'un point de vue mécanique la réalisation d'une rainure, comme dans la figure 13, fait office de raidisseur favorisant la résistance de la pièce à certains cas de chargement comme la flexion trois points.

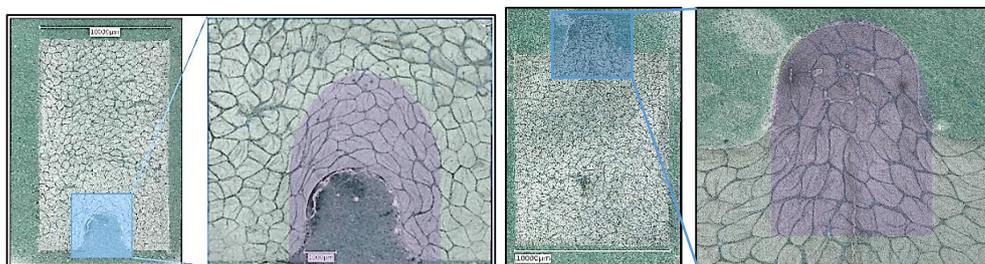


Figure 13 : Rainure dans le cylindre TOR

La zone violette sur la figure 13 présente l'ensemble des torons perturbés par la mise en forme de cette rainure lors de l'essai. C'est une zone restreinte qui peut être analysée avec la méthode de mesure de l'air des torons, mise en avant dans le chapitre 3.

La déformation des torons indique l'historique de mise en forme qu'ils ont subi (les formes des torons après mise en forme de nervures dépendent des pressions en jeu et des conditions aux limites comme le frottement lors de la mise en forme). Les formes des torons, après remontée de nervure, sont un indicateur de déformation qui peut être utilisé dans le développement de simulations procédés.

#### IV) 3 - Traceurs rhéologiques

La maîtrise de l'industrialisation d'un procédé passe, de nos jours, par les simulations produits (tenue mécanique) et procédés de mises en forme. Pour simuler le procédé de mise en forme, il peut être intéressant, pour l'utilisateur, de posséder des marqueurs se déformant avec la pièce lors des différentes mises en forme. Dans cette partie, la rhéologie spécifique du composite est présentée. Une première approche de simulation procédé est proposée ainsi que la mise en avant d'un traceur rhéologique permettant de suivre les mises en forme.

##### IV) 3) 1 - Etat de l'art

La simulation du procédé de fabrication représente une part importante des études de nouveaux procédés de mises en forme. Il est primordial de caractériser et de quantifier des phénomènes inhérents au procédé de fabrication comme l'écoulement du composite à chaud, lors de la mise en forme. Trois grandes familles physiques sont identifiées dans le forgeage composite (cf figure 14) : la mécanique, la tribologie (conditions de frottements) et la rhéologie (écoulement de la résine).

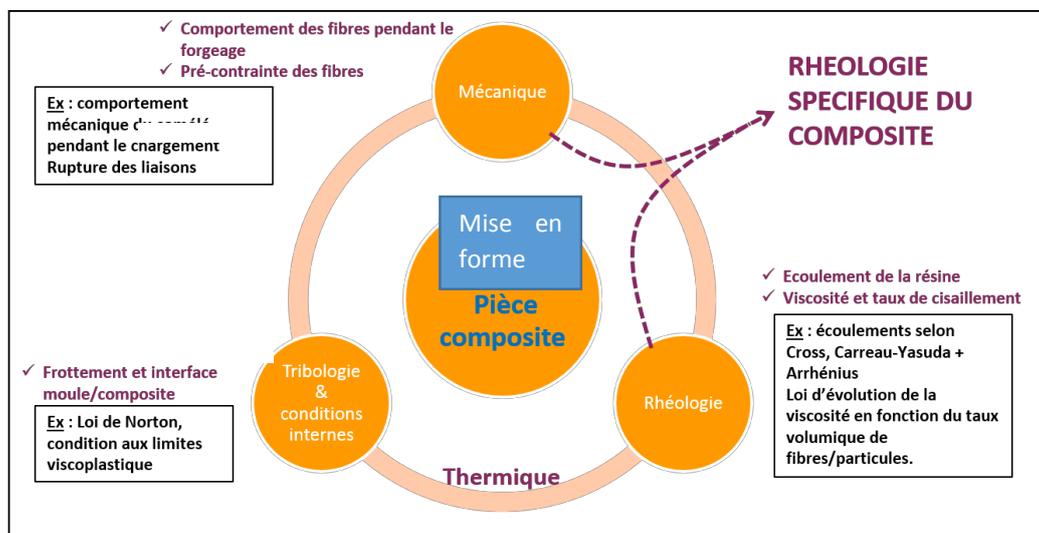


Figure 14 : Physiques autour du composite

La rhéologie des polymères est largement étudiée dans le domaine de la plasturgie. Le composite, quant à lui, de par sa nature anisotrope, présente un écoulement propre, une rhéologie spécifique du polymère. Une différence notable entre l'écoulement transverse et l'écoulement longitudinal est à distinguer. Les résines thermoplastiques présentent un comportement rhéologique caractéristique d'un fluide non-newtonien lorsqu'elles sont chauffées à température de fusion, et sont en général des fluides rhéo-fluidifiants. Cela signifie que la viscosité apparente chute non linéairement lorsque le taux de cisaillement augmente. Cette évolution de viscosité est matérialisée dans la littérature et dans les logiciels spécialisés dans la simulation de mise en forme des polymères par une loi de comportement de Carreau-Yasuda (Maffezzoli, Gennaro, and Greco 2010) (Mayer et al., n.d.), couplée avec une thermodépendance d'Arrhénius (Binétruy 2014) pour couvrir tous les cas de forgeages anisothermes. Les coefficients de Carreau-Yasuda ont ainsi été identifiés pour pouvoir être par la suite entrés dans le logiciel de simulation Forge©. L'étude de Schuler (Shuler and Advani 1996) sur ce sujet présente un intérêt certain. Il a permis de comprendre l'influence de paramètres supplémentaires sur la viscosité transverse du composite comme par exemple l'influence du taux volumique de fibres.

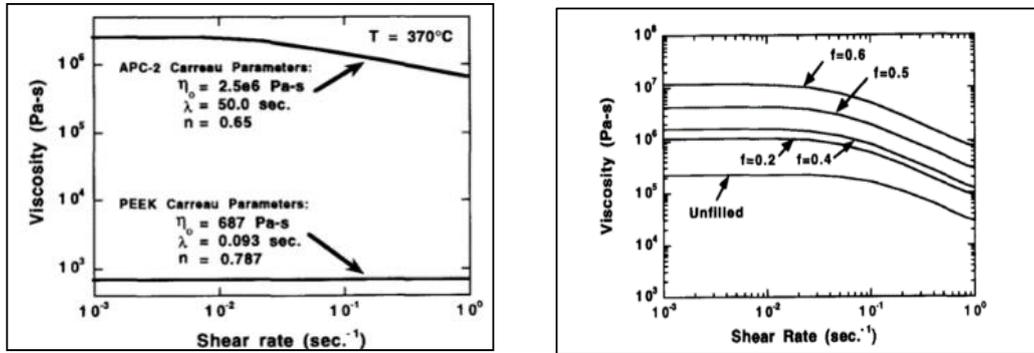


Figure 15 : Identification de Carreau-Yasuda pour différents matériaux (à gauche), à différents taux volumiques de fibres (à droite). (Shuler and Advani 1996)

La loi de Carreau-Yasuda est définie par un certain nombre de coefficients comme la viscosité initiale, la viscosité infinie, la température de référence, etc (pour les polymères amorphes la viscosité initiale est systématiquement plus grande que pour la plupart des polymères semi-cristallins). Dans le tableau 3 les différents coefficients donnés pour deux matériaux.

	PMMA	PEHD
$n_0 =$	6400	1200
$n_{inf} =$	1	1
$a =$	0,76	0,75
$n =$	0,26	0,25
$l =$	0,05	0,01
$a =$	1,00E+04	1,00E+04
$T_0 =$	503	503

Tableau 3 : exemple pour les principaux coefficients de Carreau-Yasuda pour un amorphe et un semi-cristallin

#### IV) 3) 2 - Simulation sous Forge

L'ensemble des travaux de modélisation du forgeage de composite ont été réalisés pour définir la fiabilité des outils de simulation couramment utilisés dans les secteurs de la forge. Dans ce contexte, un forgeage cylindrique a été modélisé dans le logiciel Forge@ spécialisé dans la mise en forme des métaux. Des modèles 2D et des modèles 3D ont été réalisés.

Pour se faire, le point le plus important est la mise en place d'une loi rhéologique dans le logiciel, représentative du comportement du composite. Transvalor, éditeur du logiciel, permet à l'utilisateur de définir une loi de comportement rhéologique points à points à différentes températures. Selon cette démarche, un fichier a été créé pour remplacer le fichier matériau prédéfini dans le logiciel lors de la compilation des données.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left[ \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot \left(1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^a\right)^{\frac{n-1}{a}} \right] \cdot \left[ \exp\left(\alpha \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \right]$$

Modèle de viscosité de Carreau-Yasuda      +      Thermo-dépendance selon Arrhénius  
 $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + (\tau \dot{\gamma})^a)^{\frac{n-1}{a}}$       +       $\eta(\dot{\gamma}) * \exp\left(\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$

Équation 1 : Interpolation de Carreau-Yasuda avec thermodépendance

Ci-dessous se trouve trois courbes interpolées par le logiciel de simulation pour le forgeage de polymères (ici du PMMA) à l'état fondu, à différentes températures. Le logiciel est capable d'interpoler entre ces différentes courbes, mais pas d'extrapoler. L'ensemble des points définis dans le fichier matériau sont utilisables.

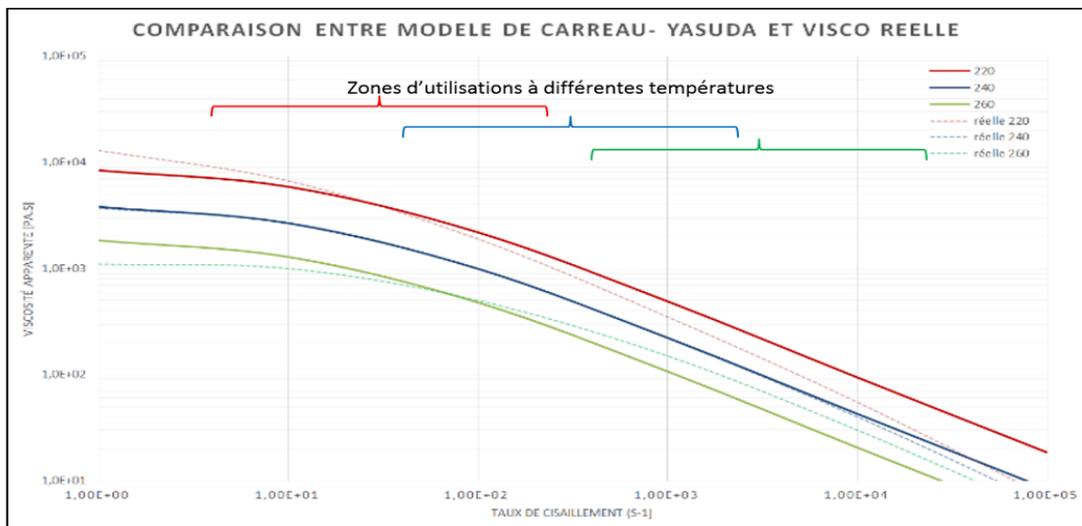


Figure 16 : Implantation de Carreau-Yasuda dans le logiciel de simulation Forge©

Les modèles 3D ont été testés dans un premier temps avec un polymère pur à l'état fondu. Les données recueillies n'étant pas représentatives du forgeage cylindrique de composite le modèle 3D a été remplacé par un modèle 2D, moins gourmand en ressources et pouvant respecter l'anisotropie du composite par sa viscosité transverse. Le modèle 2D, ci-dessous, présente la mise en forme d'une nervure circonférentielle extérieure. L'historique du champ des pressions dans la pièce ainsi que la force exercée par l'outillage peuvent être comparés au cas réel. La figure 17 ci-dessous est une première approche de simulation procédé et doit être calée en déplacements / efforts par rapport aux mises en forme réalisées dans les cas du TOR. Les couleurs rouges correspondent aux contraintes les plus élevées, les couleurs bleues correspondent aux contraintes les plus basses.

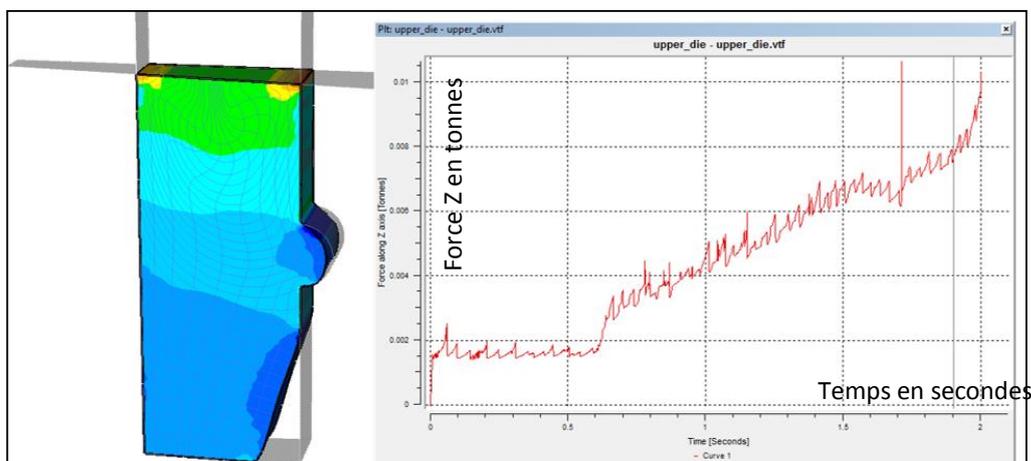


Figure 17 : Forgeage cylindrique PMMA, outillage 3D

#### IV) 3) 3 - Suivi de la mise en forme par insertion de traceurs

La compréhension du mouvement de la matière, lors des mises en forme particulières passent la plupart du temps par une phase expérimentale. Dans les procédés de filage ou d'extrusion, il est possible d'insérer des éléments à l'intérieur de la matière afin de mieux comprendre les mouvements de cette dernière à la suite de la mise en forme, et après découpe.

C'est dans cette optique, que des traceurs rhéologiques ont été placés dans la préforme, lors de l'opération d'enroulement. Ces traceurs sont des films de PPS, découpés aux dimensions du cylindre final, intercalés entre deux séries d'enroulements. La figure 18 montre deux traceurs rhéologiques radiaux mis en place pour suivre le mouvement des torons à la suite de la mise en forme.

Ces traceurs rhéologiques présentent plusieurs utilités dans la mise en forme des pièces composites :

- Ils peuvent servir de référence lors du calage de simulations procédés, permettant ainsi d'avoir une image du mouvement de fibres lors de la mise en forme (cette méthode de traceurs peut être réadaptée à la méthode des essais interrompus pour permettre le suivi de l'ensemble des mouvements des fibres)
- Ces traceurs peuvent être constitués de marqueurs visualisables en CND, évitant ainsi les découpes et analyses microscopiques de pièces.
- Dans le cas d'un procédé industrialisé, ils permettent de qualifier le moyen de mise en forme et de comprendre le mouvement de fibres dans le cas de mises en forme plus complexes.