

N° d'ordre : 2590

# THÈSE

présentée à

**L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I**

**ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET  
DE L'INGÉNIEUR**

par **François-Xavier KROMM**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

SPÉCIALITÉ : **MÉCANIQUE**

\*\*\*\*\*

**CONTRIBUTION À LA DÉFINITION D'UNE DÉMARCHE DE CONCEPTION DE  
MULTIMATERIAUX : APPLICATION À LA MISE EN ŒUVRE D'UN RÉSERVOIR  
PERMETTANT LE DÉCONFINEMENT DE MATIÈRES ÉNERGÉTIQUES**

\*\*\*\*\*

Soutenue le 29 Novembre 2002

Après avis de :

M. M. BENZEGGAGH, Professeur, Université de technologie de Compiègne

M. A.R. BUNSEL, Maître de Recherche, Ecole des Mines de Paris

Devant la commission d'examen formée de :

M. Y. BRECHET, Professeur, Institut National Polytechnique de Grenoble

Président

M. M. BENZEGGAGH, Professeur, Université de Technologie de Compiègne

Rapporteur

M. A.R. BUNSEL, Maître de Recherche, Ecole des Mines de Paris

Rapporteur

M. R. HARRY, Maître de conférences, Université Bordeaux I

Examineurs

M. T. MASSARD, Directeur adjoint CEA/DAM

M. J.M. QUENISSET, Professeur, Université Bordeaux I

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Génie Mécanique de l'IUT Bordeaux 1 en collaboration avec le CEA Le Ripault. Je remercie Michel DANIS, directeur du laboratoire, de m'avoir accueilli au sein de son équipe.*

*Je tiens à remercier Jean-Michel QUENISSET d'avoir dirigé cette thèse. Ses compétences scientifiques et son optimisme ont été déterminants pour mener à bien cette étude.*

*Je remercie également Roland HARRY d'être à l'origine de cette étude et de l'avoir co-encadré.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Thierry LORRIOT pour son implication dans le sujet et sa disponibilité tout au long de la thèse.*

*Yves BRECHET a accepté d'être le président de mon jury de thèse. Je suis très honoré de l'intérêt qu'il a porté à ce sujet.*

*J'adresse mes remerciements aux Professeurs Anthony BUNSELL et Malk BENZEGGAGH d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.*

*Thierry MASSARD a été, avec Roland HARRY, l'initiateur de cette collaboration, et a accepté de faire partie de mon jury. Qu'il reçoive ici l'expression de toute ma reconnaissance.*

*Ce projet a été pris en charge au sein du CEA Le Ripault par Hervé CHERIN pour la première année, puis par Samuel ALEXANDRE. Je tiens à exprimer toute ma gratitude à ce dernier pour son dynamisme qui a fortement contribué à l'avancée de ce travail.*

*Je remercie tous les membres du Laboratoire de Génie Mécanique, particulièrement Véronique FAVRE, Philippe DARNIS, Bernard COUTAND, et German CASTILLO pour leur soutien et leur aide pendant ces années.*

*Cette thèse comporte des aspects expérimentaux qui n'auraient pu être réalisés sans l'assistance technique de Messieurs Jean-Marc ROBERT, Frédéric PINASSOU, Jean-Pierre LARTIGAU, Jean-Claude TEYSSIER, Bernard DUBOS du Département de Génie Mécanique de l'IUT Bordeaux 1, et Eric BAUDIN du CEA Le Ripault. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.*

*Plus particulièrement, mes plus vifs remerciements s'adressent à Jean-Marc ROBERT dont les compétences, la ténacité et l'enthousiasme ont été indispensables à l'aboutissement de ce travail.*

*Je suis également reconnaissant envers les personnes qui ont contribué à l'avancée de ma thèse, notamment Messieurs Etienne DUGUET de l'ICMCB, Pierre SCHAEFFNER et Jean-Bernard LESCOS de EADS Composites Aquitaine, Jean-Michel DESTIBARDE de l'Institut de Maintenance Aéronautique, Christian LABBE de l'ENSAM, Philippe LOREAU du CEA Le Ripault, et Jean-Louis LIMOUSIN de la Snecma.*

*Je remercie Alain DUROUX, Directeur du Département de Génie Mécanique de l'IUT Bordeaux 1 de m'avoir permis d'enseigner pendant ces années.*

*J'aimerais enfin remercier Elise et Stéphane d'avoir été présents et de m'avoir tant apporté tout au long de ces années, ainsi que ma famille et mes amis pour leur soutien constant.*

# Table des matières

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>CHAPITRE 1 : ETUDE MÉTHODOLOGIQUE DE LA CONCEPTION DE PRODUITS .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Procédure générale de conception .....</b>	<b>9</b>
1.1.1 Démarche de conception.....	10
1.1.2 Les différents types de conception.....	11
1.1.3 Analyse fonctionnelle, cahier des charges fonctionnel.....	12
<b>1.2 Outils d'aide à la conception .....</b>	<b>13</b>
1.2.1 Ingénierie simultanée.....	13
1.2.2 Approche de Pahl et Beitz.....	14
1.2.3 Méthodes DFX et DFMX.....	14
1.2.4 Déploiement de la fonction qualité (QFD).....	15
1.2.5 Méthode TRIZ.....	16
1.2.6 Conception robuste, méthode de Tagushi.....	17
1.2.7 Complémentarité des différentes approches .....	17
<b>1.3 Sélection de matériaux, de formes et de procédés .....</b>	<b>18</b>
1.3.1 Sélection de matériaux, indices de performance.....	18
1.3.2 Sélection multi-critères .....	19
1.3.3 Sélection de matériaux et de géométries .....	21
<b>1.4 Conception de matériaux composites .....</b>	<b>22</b>
<b>1.5 Conclusion.....</b>	<b>24</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>25</b>
<b>CHAPITRE 2 : CONCEPTION D'UN MULTIMATÉRIAUX .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Proposition d'une démarche.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Etude de cas : conception d'un multimatériaux pour réservoir .....</b>	<b>29</b>
2.2.1 Cahier des charges du réservoir.....	29
2.2.1.1 Définition des fonctions .....	29
2.2.1.2 Classement des fonctions.....	30
2.2.2 Analyse du cahier des charges fonctionnel.....	31
2.2.3 Sélection de matériaux.....	33
<b>2.3 Conception de multimatériaux.....</b>	<b>37</b>
2.3.1 Etude du déconfinement.....	38
2.3.1.1 Mécanismes de déconfinement.....	38
2.3.1.1.1 Chute des propriétés mécaniques .....	38
2.3.1.1.2 Couplage fibre-matrice.....	39
2.3.1.1.3 Création d'ouvertures .....	40

2.3.1.2	Recherche de solutions.....	40
2.3.1.2.1	Les polymères thermoplastiques .....	41
2.3.1.2.2	Composites thermoplastiques .....	42
2.3.1.2.3	Dégradation des polymères .....	44
2.3.1.3	Réalisation pratique des concepts .....	44
2.3.2	Résistance à l'impact.....	47
2.3.2.1	Chocs et explosifs .....	47
2.3.2.1.1	Notion d'onde de choc.....	47
2.3.2.1.2	Polaire de choc.....	48
2.3.2.1.3	La physique des explosifs .....	49
2.3.2.2	Solutions pour le réservoir .....	50
2.3.3	Isolation thermique .....	51
2.3.4	Résistance à la pression, compatibilité, protection en cas de chute .....	51
2.3.5	Bilan.....	52
2.3.5.1	Choix de l'architecture du multimatériaux.....	52
2.3.5.2	Cahiers des charges et choix des constituants .....	53
2.3.6	Procédé de mise en œuvre.....	54
<b>2.4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>56</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>57</b>
 <b>CHAPITRE 3 : CARACTÉRISATION THERMOMÉCANIQUE DES CONSTITUANTS</b>		
<b>.....</b>		<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Fibres de polyéthylène.....</b>	<b>59</b>
3.1.1	Mesure du diamètre des fibres .....	60
3.1.2	Essais de traction à température ambiante.....	61
3.1.2.1	Dispositif expérimental.....	61
3.1.2.2	Correction de complaisance.....	62
3.1.2.3	Résultats des essais .....	64
3.1.2.4	Approche statistique de la résistance des fibres .....	67
3.1.2.4	Traction sur mèche de fibres à température ambiante .....	68
3.1.3	Essais de traction à température élevée.....	71
3.1.3.1	Dispositif expérimental.....	71
3.1.3.2	Essais de traction sur monofilament à température élevée .....	72
3.1.4	Essais de fluage .....	74
3.1.4.1	Dispositif expérimental.....	74
3.1.4.2	Essais de fluage sur filaments de polyéthylène .....	75
<b>3.2</b>	<b>Polyéthylène haute densité moulé par aspiration.....</b>	<b>77</b>
3.2.1	Fabrication des éprouvettes .....	77
3.2.2	Essais de traction.....	78
3.2.2.1	Dispositif expérimental.....	78
3.2.2.2	Détermination du module d'Young.....	79
3.2.2.3	Détermination des propriétés à rupture.....	80
3.2.3	Caractérisation au fluage.....	80
3.2.3.1	Dispositif expérimental.....	81
3.2.3.2	Essais de fluage .....	81
<b>3.3</b>	<b>Liner en aluminium.....</b>	<b>84</b>
<b>3.4</b>	<b>Isolant céramique.....</b>	<b>85</b>
<b>3.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>86</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>88</b>

<b>CHAPITRE 4 : DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES FONCTIONNELS DU MULTIMATÉRIAUX .....</b>	<b>89</b>
4.1 Définition du filet fibreux de renforcement.....	89
4.2 Simulation du comportement à froid de la couche de PEHD.....	92
4.3 Choix des paramètres dimensionnels du multimatériaux.....	94
4.4 Comportement du liner .....	95
4.4.1 Déformation sous la pression de 30 bars .....	96
4.4.2 Influence du liner sur le déconfinement.....	97
4.5 Simulation du déconfinement.....	97
4.5.1 Principe des calculs effectués .....	97
4.5.1.1 Mécanismes de déconfinement.....	97
4.5.1.2 Couplage thermomécanique.....	98
4.5.1.3 Analyse du comportement de la structure .....	99
4.5.1.4 Simulation des transferts de chaleur.....	100
4.5.2 Ruine du filet de renforcement.....	101
4.5.2.1 Faisceau de fibres sollicité de manière homogène .....	101
4.5.2.2 Faisceau de fibres sollicité de manière non homogène .....	103
4.5.3 Rupture de la couche de PEHD.....	106
4.5.4 Simulation des deux mécanismes .....	108
4.5.5 Simulation du déconfinement par éléments finis .....	109
4.6 Conclusion.....	111
<b>CHAPITRE 5 : VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU MULTIMATÉRIAUX .....</b>	<b>113</b>
5.1 Conception de l'essai .....	113
5.2 Réalisation d'un prototype .....	114
5.2.1 Conditions de mise en oeuvre .....	114
5.2.2 Conception de l'outillage.....	115
5.2.3 Examen critique de la réalisation et propositions d'améliorations .....	117
5.3 Validation expérimentale de la conception.....	118
5.3.1 Dispositif expérimental.....	118
5.3.2 Essai de mise sous pression.....	119
5.4 Conclusion.....	120
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>123</b>



# Introduction

Depuis de nombreuses années, les chercheurs ont tenté de rationaliser le processus de conception, y parvenant avec plus ou moins de réussite. Ce travail, qui constitue la première phase du cycle de vie d'un produit, est apparu essentiel puisque de sa qualité, et du soin qui lui est apporté dépendent les phases suivantes du cycle de vie. Ce rôle important a donc poussé à essayer de comprendre les mécanismes de cette activité. De nombreuses méthodes ont ainsi vu le jour, permettant aux concepteurs de suivre des démarches rigoureusement définies, mais ne supprimant tout de même pas la part d'intuition inhérente à l'innovation.

Plus récemment, le développement des techniques informatiques a permis de fournir des outils supplémentaires aux ingénieurs, en systématisant un peu plus ce processus, et en automatisant les tâches qui pouvaient l'être, comme par exemple la recherche d'une solution dans une base de données.

Dans cet esprit, et venant compléter les méthodes classiques de conception, les méthodes de choix de matériaux ont été créées et développées depuis une dizaine d'années. Leur but est de permettre au concepteur de faire une sélection objective de matériau pour la pièce qu'il étudie. Leur grand intérêt était de s'attaquer à une forme de conservatisme qui consistait souvent à négliger cette étape pour se contenter de choisir des matériaux habituellement employés par l'utilisateur. Ces méthodes se sont avérées fort utiles lorsque, souvent poussés par des problèmes économiques ou liés à la concurrence, les concepteurs ont décidé de rendre moins empiriques leurs choix de matériaux et de les optimiser vis à vis de leurs objectifs.

Parallèlement à cela s'est répandue dans beaucoup de bureaux d'études une tendance à vouloir intégrer certaines fonctions d'une pièce dans son matériau. Cette démarche permet en effet de simplifier les structures, de supprimer des assemblages compliqués et d'accéder à de meilleures performances, en reportant toutefois bien des difficultés sur le choix des matériaux. Ce raisonnement conduit en effet, du point de vue du matériau, à la définition de cahiers des charges de plus en plus complexes, touchant à des domaines de plus en plus variés. Il était donc inévitable que les matériaux monolithiques "classiques" montrent rapidement leurs limites face à ce nouveau type de demandes.

Pour pallier cette carence, il a fallu concevoir de nouveaux matériaux à partir de ceux qui étaient disponibles, dans le but de répondre à ces nouveaux cahiers des charges. La

réponse à un problème de conception n'est donc plus recherchée dans la définition d'un produit mais dans la conception d'un matériau "multifonctions" adapté à l'application. Il ne s'agit plus d'un assemblage de pièces utilisant des matériaux différents mais de combinaisons de matériaux permettant l'obtention de propriétés nécessaires à la réalisation d'une mission, que les constituants n'avaient pas séparément. Le comportement global du multimatériaux découle alors de mécanismes gouvernés, rendus possibles grâce aux propriétés des constituants.

L'exemple le plus frappant de ce développement est certainement celui des matériaux composites. Ces matériaux, dont l'élaboration semblait coûteuse dans les premières années, ont connu un essor considérable lorsque les ingénieurs ont cherché à alléger des structures tout en augmentant leur raideur, ou bien encore leur ténacité.

Ce seul exemple suffit toutefois à soulever un problème. En effet, les matériaux composites ne représentent qu'une des nombreuses possibilités de combiner des matériaux, et pourtant, il est possible de percevoir l'étendue du champ de solutions qu'ils offrent à travers les avantages cités. Pour définir un multimatériaux répondant à son cahier des charges, le concepteur se trouve donc confronté à une infinité de solutions potentielles dans lesquelles il va falloir faire des choix.

Dans ce contexte, il est apparu nécessaire de pouvoir fournir des outils pour le développement des multimatériaux, puisque ni les méthodes de conception classiques ni les méthodes de choix de matériaux n'y sont adaptées. Le but de cette étude est donc d'apporter une contribution à la mise au point d'une méthode de conception de multimatériaux. La démarche qui est appliquée repose sur deux idées :

- (1) s'inspirer des méthodes de conception et des méthodes de choix de matériaux en retenant certains de leurs principes,
- (2) mener une étude complète de conception de multimatériaux de manière à confronter la démarche proposée à un cas concret.

Le premier chapitre est donc consacré à une étude bibliographique concernant les méthodes de conception et de sélection de matériaux. Sans être forcément exhaustif étant donné les nombreux travaux consacrés à ce sujet, ce travail vise essentiellement à étudier les mécanismes de ces méthodes pour en dégager les avantages et les inconvénients dans l'optique d'une conception de multimatériaux.

Dans le second chapitre, l'étude de cas concernant la conception d'un matériau pour un réservoir destiné au transport de matières énergétiques est abordée. Après avoir décrit précisément l'application pour en tirer son cahier des charges fonctionnel, la recherche de solutions est effectuée. Aucune solution n'ayant été trouvée grâce aux méthodes de sélection de matériaux, la conception du multimatériaux est lancée. La sélection des mécanismes de satisfaction des fonctions conduit ainsi au choix d'une architecture, puis des constituants. Enfin, un procédé de mise en œuvre original doit être proposé pour ce multimatériaux.

Les propriétés du multimatériaux découlant de la combinaison de celles des constituants, il est nécessaire de caractériser chaque matériau séparément. Cette caractérisation abordée dans le troisième chapitre a été dirigée vers les propriétés des différents matériaux dans le cadre de la réalisation et du fonctionnement du réservoir. Elle nécessite donc, en plus des essais mécaniques classiques de traction à diverses températures ou de fluage, la mise au point d'essais spécifiques à cette application.

Le quatrième chapitre est consacré à la définition des paramètres dimensionnels de ce multimatériaux et à la simulation de son comportement dans la réalisation des fonctions essentielles. Les propriétés déterminées au troisième chapitre sont utilisées pour évaluer grâce à des simulations la réalisation des fonctions, et éventuellement ajuster certains paramètres caractéristiques du multimatériaux.

Enfin, la dernière partie de cette étude concerne la validation de la démarche par une vérification expérimentale de la conception retenue pour l'étude de cas. Le multimatériaux doit donc être fabriqué puis testé dans des conditions reproduisant les fonctions qu'il est sensé assurer.



# Chapitre 1 : Etude méthodologique de la conception de produits

Le développement des multimatériaux durant les dix dernières années a fait apparaître le besoin de nouvelles méthodes de conception. En effet, la recherche de plus en plus fréquente de l'intégration des fonctions d'une pièce dans les propriétés de son matériau constitutif conduit à la rédaction de cahiers des charges complexes et abordant une grande variété de domaines. Suivant le déroulement d'une étude de conception classique, la définition du cahier des charges doit être faite à partir des attendus exprimés par le client. Sur cette base, la recherche de solutions est lancée, débouchant, pour chaque concept, à un cahier des charges du matériau, permettant l'application de méthodes de sélection de matériaux.

Dans le cas évoqué précédemment, où le cahier des charges du matériau est complexe, il arrive souvent qu'aucun des matériaux monolithiques disponibles ne permette de réaliser la conception proposée. Un multimatériau doit alors être conçu pour répondre à ce besoin. Face au manque de méthode de conception spécifique, on se propose d'étudier les méthodes de conception de produits pour en extraire des principes de base applicable aux multimatériaux.

## **1.1 Procédure générale de conception**

La conception d'une pièce consiste à choisir les attributs, appelés éléments de conception, relatifs à sa définition et sa réalisation. Dans la plupart des cas, ces attributs sont le nombre de composants formant la pièce, leur géométrie, leur(s) matériau(x) constitutif(s), leur procédé de fabrication et les procédés d'assemblage à utiliser pour les réunir. Nous allons dans ce chapitre nous intéresser à la démarche qui gouverne cette opération en définissant les différents types de problèmes de conception qui peuvent se poser, et l'approche généralement employée pour les traiter.

### **1.1.1 Démarche de conception**

Pour enclencher le processus de conception d'un produit industriel de quelque nature qu'il soit (matériel, logiciel, organisation, service...), il est nécessaire de faire apparaître un besoin du marché. La définition et l'expression précise de ce besoin constituent une étape fondamentale qui conditionne la réussite de la conception. Cette étape sera détaillée dans l'étude de l'établissement d'un cahier des charges.

La conception se divise ensuite en plusieurs phases qui permettent de définir progressivement un produit, en affinant ses attributs à chaque étape, et en resserrant peu à peu le champ des solutions.

Dans un premier temps, le travail consiste à établir tous les concepts qui sont susceptibles de satisfaire le cahier des charges défini précédemment.

Ensuite, chacun des concepts trouvés doit être étudié plus précisément, de façon à évaluer, même de manière approximative vu l'état d'avancement de l'étude, ses caractéristiques élémentaires telles que celles de son dimensionnement.

A ce stade, le concepteur doit effectuer un choix parmi toutes ces solutions potentielles. La simulation de ces solutions, même si elle ne saurait être le dimensionnement définitif, doit tout de même être menée de manière très rigoureuse pour ne pas entraîner un mauvais choix, et l'élimination abusive d'une solution.

La dernière étape est celle où tous les détails du produit sont fixés. Cette fois ci, l'étude du comportement du seul concept restant doit être la plus approfondie possible, puisqu'elle conduit à la définition du produit final. Cela implique donc une ou plusieurs simulations numériques, et éventuellement des campagnes expérimentales de caractérisation de matériaux.

Les différentes phases décrites ici peuvent être représentées sous la forme d'un organigramme [Landru, 2000] présenté à la figure 1.1.

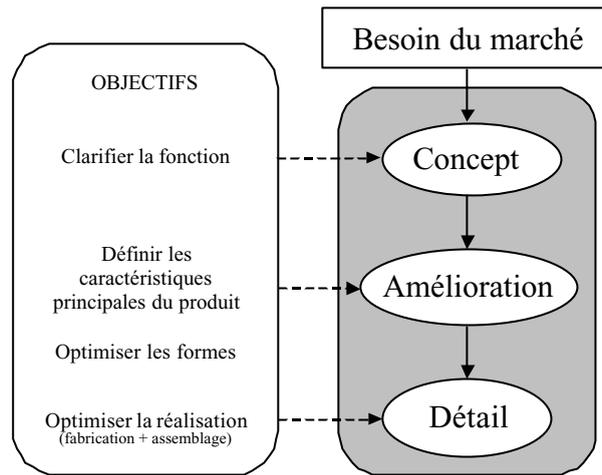


Figure 1.1 : Différentes phases dans la conception d'un produit

Ce type de cycle de développement d'un produit est appelé modèle de phases. Même s'il existe d'autres approches, il reste le plus employé et celui dont le déroulement paraît le plus "naturel".

### 1.1.2 Les différents types de conception

La méthode qui vient d'être décrite peut s'appliquer à différents types de problèmes de conception. En effet, on distingue trois cas [Bréchet, 1997] suivant que l'étude ne vise à obtenir qu'une variante d'un produit existant ou si au contraire elle développe un nouveau concept. Ces trois grandes classes de conception sont donc :

- (1) la conception originale : elle concerne la création de produits novateurs dans le sens où soit ils répondent à un besoin nouveau, soit ils s'appuient sur une technologie innovante.
- (2) la conception adaptative : elle part d'un produit déjà existant, et cherche seulement à améliorer son principe de fonctionnement.
- (3) La conception de variation : elle vise seulement à modifier un des attributs d'un produit existant sans en modifier le principe de fonctionnement.

La description de ces trois grandes classes de problèmes de conception montre bien que le principe général d'un modèle de phase s'appliquera avec quelques nuances. En effet, dans le cas d'une conception innovante, la recherche de concepts répondant à la fonction se

fera dans un champ le plus large possible, alors que la conception adaptative et plus encore la conception de variation seront assujetties a beaucoup plus de contraintes qui resserrent le champ des solutions.

### 1.1.3 Analyse fonctionnelle, cahier des charges fonctionnel

Comme il a été signalé dans la description de la démarche de conception, tout problème de conception a pour origine un besoin d'un marché. Une étape capitale de la conception d'un produit est celle où le concepteur va devoir traduire ce besoin en termes techniques précis grâce auxquels les méthodes de conception sont applicables. Ce travail, appelé analyse fonctionnelle, doit déboucher sur la rédaction du cahier des charges fonctionnel du produit.

L'analyse fonctionnelle consiste tout d'abord à étudier l'environnement du produit en déterminant clairement sa finalité, le cadre de son utilisation et son incidence sur son milieu [Zanin]. Ainsi, il sera possible d'établir des liens avec l'environnement, de façon à les exprimer ensuite clairement en termes de fonctions et de contraintes. Par la suite, toutes ces fonctions sont hiérarchisées et placées sur un diagramme appelé arbre fonctionnel permettant de montrer l'organisation logique de ces fonctions en fonctions principales ou secondaires.

Ainsi, si on nomme  $F_p$  la fonction principale du produit,  $F_i$  ses fonctions secondaires établies lors de l'analyse fonctionnelle,  $C_i$  les contraintes, et  $F_{i,j}$  les fonctions terminales, l'arbre fonctionnel peut être construit ainsi que le montre la figure 1.2.

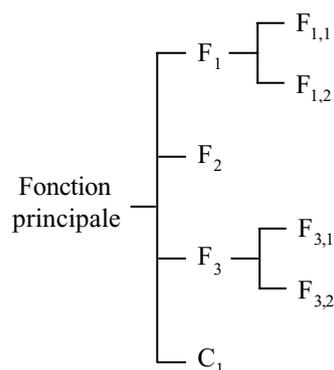


Figure 1.2 : Organisation des fonctions et contraintes dans l'arbre fonctionnel

Le cahier des charges fonctionnel est un document chargé d'exprimer toutes les fonctions ou propriétés demandées au produit [Dessarthe, 1996]. Il est défini par la norme AFNOR X50-151 :

"Document par lequel un demandeur exprime un besoin en termes de fonctions de services et de contraintes. Pour chacune d'elles sont définis les critères d'appréciation et leur niveau, chacun de ces critères étant assorti d'une flexibilité."

Cette définition montre deux aspects de l'analyse fonctionnelle qui sont la définition des fonctions la plus rigoureuse possible pour répondre le plus justement au besoin, mais aussi la nécessité de fixer des critères d'évaluation d'une solution éventuelle.

## **1.2 Outils d'aide à la conception**

La démarche décrite dans le paragraphe précédent ne donne qu'une approche très globale du travail de conception, puisque la façon dont les concepts et les solutions sont en général trouvés n'a pas été abordée. Pourtant, cela constitue un point capital de la conception, tout en étant peut être celui qui est le moins bien maîtrisé, tant les mécanismes de la créativité sont complexes.

Pour tenter de systématiser cette opération, le concepteur dispose "d'outils d'aide à la conception". Ce terme désigne en fait des méthodes qui ont été établies pour essayer de rationaliser le processus de conception, chacune donnant au final une approche originale. Le but de ce paragraphe n'est pas de dresser une liste exhaustive de ces méthodes mais plutôt de présenter succinctement les plus répandues, en s'attachant à montrer leurs avantages et inconvénients.

### **1.2.1 Ingénierie simultanée**

L'ingénierie simultanée est une méthode basée sur le principe selon lequel tous les aspects liés au cycle de vie d'un produit peuvent être pris en considération lors de la conception. Elle est née du constat que le cloisonnement entre les différentes branches d'activités en relation avec la conception d'un produit avait des conséquences néfastes sur l'efficacité de la conception, que ce soit en terme de qualité de résultat ou de délais. Le résultat obtenu par cette voie est sensé assurer un équilibre entre les exigences de chaque phase et conduira au compromis le plus satisfaisant.

L'avantage de cette méthode est d'intégrer le caractère pluridisciplinaire de la conception qui jusqu'alors se déroulait en phases successives clairement distinctes.

Cependant, dans la pratique, il semble que la communication entre les acteurs de l'étude, les transferts éventuels entre les différents outils logiciels, ne soient pas évidents à réaliser [Sayettat, 2000]. De plus, il est difficile de déterminer si l'ingénierie simultanée doit être considérée comme un ensemble de techniques de conception, une nouvelle approche, ou carrément une philosophie à appliquer à l'échelle de l'entreprise [Wilson, 1995].

### **1.2.2 Approche de Pahl et Beitz**

Les travaux de recherche de Pahl et Beitz sur le processus de conception figurent parmi les plus importants, tant leur influence sur ce domaine a été grande. En particulier, ils sont à l'origine de la définition des trois classes de problèmes de conception (originale, adaptative ou de variation), ainsi que du principe de l'accroissement du niveau de détail au fur et à mesure que l'étude progresse.

En plus de ces travaux de formalisation, une approche méthodologique a été proposée pour simplifier la tâche du concepteur. Elle consiste à diviser le problème complet en plusieurs sous problèmes, qualifiés de "modules fonctionnels" [Lovatt, 1998], présentant un minimum d'interaction entre eux. On transforme donc ainsi un problème unique et complexe en une somme de petites études concernant des cahiers des charges beaucoup plus simples.

En pratique, on constate que même si la phase de conception est effectivement rendue moins contraignante, la multiplication des modules fonctionnels indépendants entraîne une augmentation de la complexité du résultat.

### **1.2.3 Méthodes DFX et DFMX**

Les méthodes DFX peuvent être placées dans la lignée de la vision pluridisciplinaire de l'ingénierie simultanée. Le sigle DFX, qui est l'abréviation de "Design For X", indique que le principe de ces méthodes est basé sur le fait de concevoir le produit en vue d'optimiser sa propriété X, celle-ci pouvant désigner un attribut du produit (coût, impact sur l'environnement...) ou une phase de son cycle de vie (fabrication, maintenance...). Ces méthodes consistent à n'étudier que l'influence de X sur les autres propriétés, contrairement à l'ingénierie simultanée où toutes les phases du cycle de vie sont prises en compte avec le même degré d'importance.

Ces méthodes sont de plus en plus développées, et touchent à des domaines de plus en plus variés. On compte ainsi parmi les voies les plus répandues [Kuo, 2001] :

- Design for manufacturing (DFM)
- Design for assembly (DFA)
- Design for disassembly and recyclability
- Design for environment (DFE)
- Design for service (DFS)
- Design for quality (DFQ)
- Design for cost (DFC)
- Design for life cycle (DFLC)
- Design for maintainability (DFMt)
- Design for reliability (DFR)

Le fait que ces méthodes mettent l'accent sur une propriété de la pièce à concevoir les rend peu appropriées aux multimatériaux puisqu'il a été vu précédemment que ces derniers étaient le plus souvent nécessaires dans des cas où le cahier des charges était trop complexe pour être satisfait par un monomatériau.

Par la suite, pour appliquer ce principe en le rendant moins restrictif, les méthodes DFMX ("Design For Multiple X") ont été développées. Toutefois, cette extension de la méthode entraîne des complications puisqu'elle oblige à modéliser l'influence des différents X considérés [Boothroyd, 1994] et à prendre en compte leurs interactions éventuelles.

#### **1.2.4 Déploiement de la fonction qualité (QFD)**

La méthode QFD (Quality Function Development) est basée sur le fait que la fiabilité et la qualité d'un produit sont déterminées en grande partie dans les premières phases du développement. La première étape (classique en conception) consiste donc à décrire précisément le besoin du client, et le traduire en termes utilisables par le concepteur. Ensuite, plusieurs tableaux sont construits [Kim, 1998][Govers, 2001] mettant en relation les variables associées à une phase de la conception avec celles associées à la phase suivante. Ainsi par exemple [Govers, 1996][Terninko, 1998], à partir d'un tableau il est possible de déduire un concept issu du cahier des charges, à partir d'un autre tableau, une conception précise du produit est susceptible de traduire ces concepts, conception à laquelle un dernier tableau associera un procédé de fabrication (figure 1.3).

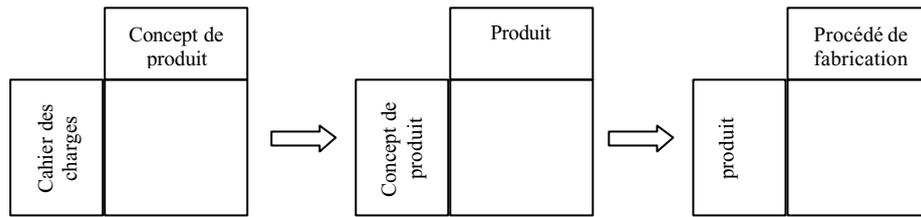


Figure 1.3 : Enchaînement des tableaux QFD

Il apparaît donc que cette méthode, même si elle met aussi en avant le caractère pluridisciplinaire de la conception, se différencie de l'ingénierie simultanée par le fait que toutes les phases sont étudiées successivement, et se déduisent à chaque fois de la phase précédente. Par conséquent, cette méthode donne une importance accrue aux premières phases (rédaction du cahier des charges, recherche de concepts) par rapport aux suivantes qui sont inévitablement orientées par les choix antérieurs.

### 1.2.5 Méthode TRIZ

Plus qu'une simple méthode de conception, la méthode TRIZ est plutôt assimilée à une méthode de créativité ou d'innovation (son nom est en russe l'acronyme de "théorie de résolution des problèmes inventifs", aussi appelée TIPS en anglais). Elle est fondée sur l'hypothèse qu'il existe quelques principes universels d'invention. Pour les mettre en évidence, plus de deux millions de brevets ont été étudiés [Gogu], non pour essayer de donner une liste de réponses toutes faites à des problèmes précis, mais plutôt pour essayer d'en dégager l'essence, c'est à dire des principes fondamentaux simples et généraux. L'avantage de ces principes est d'être applicables à bien des domaines puisque issus de l'étude de brevets provenant d'une grande variété de branches d'activité.

Un autre intérêt de cette méthode est d'avoir mis en évidence le fait que les problèmes de conception qui semblent insolubles comportent des contradictions dans leur cahier des charges, c'est à dire des fonctions à caractère antagoniste. Ainsi, en cherchant à améliorer une caractéristique du produit, on en détériore implicitement une autre. Pour contourner ces problèmes, TRIZ propose quarante principes d'innovation qui, disposés dans un tableau appelé "matrice de résolution des contradictions" [Cavallucci], permettent de trouver des concepts susceptibles d'engendrer des solutions par la suite.

L'apport le plus important de cette méthode est de rendre possible et de systématiser la recherche de concepts dans le cas de problèmes qui semblent insolubles. Elle laisse tout de

même un rôle non négligeable à la créativité propre du concepteur puisqu'elle ne fait que proposer des orientations à l'étude. En revanche, elle présente l'inconvénient d'être assez difficile à mettre en pratique, et de plus, elle ne permet pas une optimisation très poussée de la solution obtenue.

### **1.2.6 Conception robuste, méthode de Tagushi**

La conception robuste peut être définie comme la conception d'un système qui assure un niveau de performance donné malgré des variations de différents paramètres et la présence éventuelle d'autres perturbations tendant à diminuer ses performances [Sunar, 2001].

Cette méthode se décompose en trois phases qui sont la définition du concept ou du produit, le choix des paramètres, puis l'étude de leur degré d'influence sur la réponse pour déterminer le niveau à donner à chacun de ces paramètres. A l'origine utilisée avec une réponse simple, cette méthode peut être employée dans le cadre d'une conception multi-critères [Kunjur, 1997].

Cette approche a été très utilisée du fait de sa simplicité, mais reste essentiellement une méthode d'optimisation plus qu'une méthode de conception proprement dite, puisqu'elle ne fournit pas de renseignements quant à la définition du concept.

### **1.2.7 Complémentarité des différentes approches**

L'examen des méthodes les plus classiques qui vient d'être effectué montre bien qu'il n'en existe pas une réellement prépondérante par rapport aux autres [Hsiao, 2002], chacune ayant ses avantages et ses défauts propres. Pour contourner ces derniers et remédier aux points faibles d'une méthode, il est possible d'en combiner plusieurs [Cavalucci, 2000], puisque généralement, les problèmes ne sont pas les mêmes d'une approche à l'autre.

La combinaison la plus classique [Terninko, 1997] [Domb, 1998] consiste à commencer l'étude en utilisant la méthode QFD dans une première phase de collecte d'information sur les fonctions du produit et son environnement. Une fois le cadre et les objectifs de l'étude clairement définis, la recherche de concepts répondant à la demande peut être lancée par le biais de la méthode TRIZ. Enfin, les détails du produit peuvent être fixés en appliquant la méthode d'optimisation de Tagushi.

## 1.3 Sélection de matériaux, de formes et de procédés

Dans la démarche d'un problème de conception classique tel qu'il a été présenté précédemment, la phase de sélection de matériaux fait suite à la recherche de solutions. La méthode des indices de performances permet de faire un classement entre les différents matériaux d'une base de données pour choisir le mieux adapté à une application donnée. Ensuite, cette méthode a connu des développements vers les sélections multi-critères ou l'extension à la sélection des procédés ou des formes.

### 1.3.1 Sélection de matériaux, indices de performance

Avant de se lancer dans la sélection de matériaux, il faut se fixer un critère d'évaluation. Ainsi, on appelle performance la caractéristique du matériau dont le niveau définit la valeur de la pièce, c'est à dire le degré de satisfaction qu'elle apporte par rapport au cahier des charges.

La première étape de cette méthode réside donc dans la détermination des propriétés du matériau qui influencent la performance de la pièce et dans la mise en évidence des mécanismes suivant lesquels ces propriétés contrôlent cette performance [Ashby, 1989]. La performance d'une pièce est une fonction des propriétés du matériau qui la constitue, de sa géométrie et des requêtes fonctionnelles, c'est à dire des sollicitations extérieures. Si on représente ces trois classes de paramètres respectivement par les lettres M, G et F, la performance peut donc s'écrire sous la forme :

$$P = f(F,G,M)$$

Dans la plupart des cas, on peut isoler du reste de l'expression les termes relatifs aux propriétés du matériau ; il n'y a pas couplage par exemple entre M d'une part et F et G d'autre part :

$$P = f_1(M)f_2(G,F)$$

Grâce à cette opération, le choix du matériau peut se faire sans avoir à connaître la totalité des données du problème puisque la maximisation de la performance P est ramenée à la maximisation de la fonction  $f_1(M)$  pour tout  $f_2(G,F)$ . L'indice de performance du matériau M sera donc  $f_1$  s'il s'agit de maximiser la fonction P ou  $1/f_1$  s'il faut au contraire la minimiser. Cette étape de choix peut se faire de manière mathématique en étudiant la fonction  $f_1$  ou bien de manière graphique en utilisant des cartes de propriétés des matériaux.

Cette méthode fournit une approche simple de la conception à travers le choix du matériau constitutif de la pièce, et évite le "réflexe" habituel consistant pour le concepteur à se retourner vers les matériaux qu'il connaît le mieux ou qui sont employés classiquement pour l'application considérée.

En revanche, même si les résultats sont généralement satisfaisants, cette approche peut se révéler trop basique car à l'évidence, la séparation mathématique effectuée entre les variables relatives aux propriétés du matériau et les autres ne se justifie pas toujours dans la réalité, tant le choix du matériau et de la géométrie peuvent être liés. De plus, elle ne permet pas d'exploiter le potentiel des multimatériaux puisqu'elle se base sur un classement de matériaux répertoriés dans une base de données. D'autre part, les problèmes réels étant souvent assez complexes, il faut pouvoir arriver à effectuer un choix de matériau dans le cas d'une sélection multi-critères. Pour ces raisons, cette approche a entraîné des développements de façon à la rendre plus proche des besoins réels du concepteur.

### **1.3.2 Sélection multi-critères**

Les problèmes de sélection multi-critères regroupent deux types de problèmes : sélection multi-astreintes et sélection multi-objectifs. Pour traiter le cas d'une sélection multi-astreintes, il est nécessaire de se ramener à un problème classique et exploitable par la méthode des indices de performances. Pour cela, il faut déterminer l'astreinte dite limitante, c'est à dire celle qui limite le plus le champ des solutions, et qui est la plus contraignante vis à vis des propriétés du matériau.

En ce qui concerne les problèmes de sélection multi-objectifs [Ashby, 2000], trois possibilités s'offrent au concepteur pour effectuer le choix de matériau :

- (1) on trace sur les cartes de propriétés de matériaux des lignes d'échange (figure 1.4), c'est à dire des courbes définissant la meilleure combinaison entre les propriétés considérées.

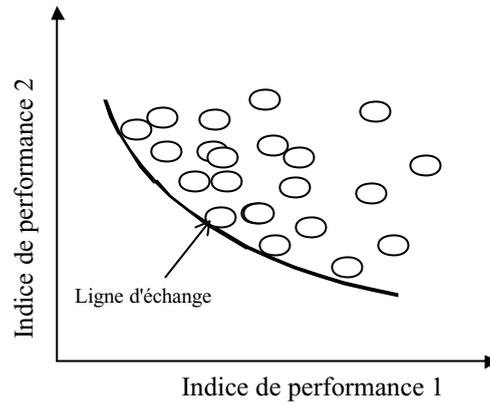


Figure 1.4 : Choix de matériau grâce aux lignes d'échange

Une fois ces lignes d'échange définies, le choix parmi les solutions dites "non-dominées", c'est à dire se trouvant sur la ligne d'échange, est effectué intuitivement.

- (2) un seul objectif est conservé en l'état, les autres sont transformés en contrainte de conception.
- (3) Une fonction valeur  $V$  est définie par une combinaison des performances relatives à chaque objectif, donnant une expression de la forme :

$$V = \sum_i \alpha_i P_i \text{ où } P_i \text{ est la performance du matériau pour l'objectif}$$

$i$ , et  $\alpha_i$  le coefficient d'importance attaché à cet objectif.

Cette méthode est la plus répandue, même si elle introduit à nouveau un caractère intuitif par l'intermédiaire de cette pondération affectée aux différents objectifs. Le problème est alors ramené à l'optimisation de la seule fonction  $V$  [Bader, 1997].

Cette dernière facette de la sélection multi-critères semble intéressante vis à vis de la conception de multimatériaux. En effet, devant la multiplicité des fonctions, la définition d'une pondération entre les indices de performance et la création de cette fonction valeur permettent une comparaison assez simple entre les solutions.

### 1.3.3 Sélection de matériaux et de géométries

La conception d'un produit a été définie comme la détermination de ses attributs (géométrie, matériau) ainsi que ceux de sa réalisation (procédé, paramètres). Il est donc important de pouvoir relier les matériaux aux procédés de mise en forme qui peuvent leur être appliqués [Landru, 2001]. Dans un premier temps, la sélection d'un procédé se fait par élimination, en ne gardant que ceux qui sont réalisables. Ensuite, un classement doit être opéré parmi les restants. Pour cela, on distingue les procédés de mise en œuvre et de mise en forme, les procédés de mise en forme primaires et secondaires suivant leur déroulement chronologique [Bréchet, 2000]. Par la suite, le choix du procédé se fera essentiellement par une estimation du coût, pour s'orienter vers le moins cher.

Par ailleurs, la description de la méthode de sélection de matériaux a mis en évidence le rôle de l'hypothèse simplificatrice qui consiste à considérer le choix du matériau indépendant de celui de la géométrie. Cette hypothèse paraît tout de même assez restrictive puisqu'il est connu que pour un matériau donné, toutes les formes ne seront pas réalisables.

Comme pour les sélections précédentes, le premier besoin pour choisir une géométrie est de pouvoir l'évaluer et effectuer un classement entre les différentes solutions pour faire un choix objectif. On définit donc l'efficacité de la section d'un élément de structure [Weaver, 1996] par le fait qu'elle nécessite pour supporter un chargement donné le moins de matière possible, et qu'elle rend donc la structure la plus légère possible. Pour quantifier cette efficacité, on définit un facteur de forme  $\Phi$  [Ashby, 1991] dépendant de la sollicitation (traction/compression, torsion, flexion) et du critère dimensionnant (raideur, résistance, flambage...). Dans la pratique, il est possible de trouver des valeurs limites pour  $\Phi$  qui sont imposées soit par des contraintes de fabrication, soit par les propriétés du matériau lui même [Weaver, 1997]. Deux méthodes sont employées pour déterminer ces limites :

- (1) empirique : les données disponibles sur les géométries et matériaux existants sont mis sous forme de graphiques, d'où on tire une valeur limite de  $\Phi$ .
- (2) théorique : on établit une expression de  $\Phi$  après avoir étudié le comportement mécanique de la structure et surtout son mode de rupture.

Cette méthode de sélection permet donc de choisir à la fois le matériau et une géométrie réalisable adaptée aux sollicitations. Toutefois, le défaut de ces méthodes de sélection reste toujours de rechercher les solutions dans une base de données de matériaux ou de structures existants. C'est donc un facteur limitant pour cette démarche puisqu'elle ne s'applique pas directement dans le cadre d'innovations importantes, particulièrement dans le domaine des multimatériaux où la structure, l'agencement des matériaux et leurs couplages jouent autant sur les propriétés que la nature des constituants eux mêmes.

## 1.4 Conception de matériaux composites

Les méthodes qui viennent d'être énumérées montrent la difficulté de leur application aux matériaux composites, et plus généralement aux multimatériaux. Pour cette raison, il semble important de s'intéresser aux travaux de recherche effectués pour le développement des matériaux composites puisqu'ils donnent lieu à la création de méthodes spécifiques.

L'application des méthodes de sélection de matériaux aux composites a été développée [Ashby, 1993]. Elle débute de la même manière qu'une étude classique puisqu'on doit définir pour la pièce les indices de performances qui guident la conception. La spécificité de cette méthode tient ensuite dans la prise en compte des propriétés des composites dans la base de données. Pour cela, des modèles sont utilisés pour donner un encadrement des propriétés du composite en fonction de celles de ses constituants et des proportions de chacun. On peut ainsi définir de nouvelles cartes de propriétés (figure 1.5) pour la résolution graphique du problème de choix de matériau.

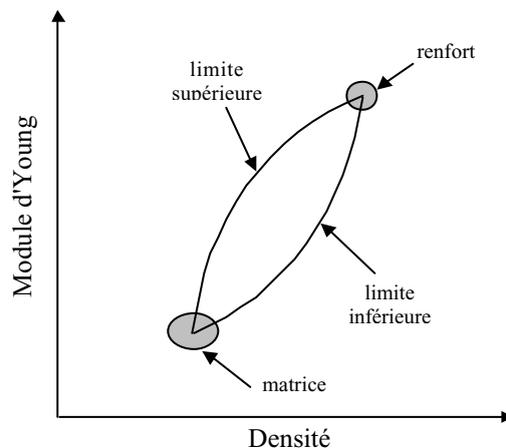


Figure 1.5 : Représentation schématique de la définition de l'enveloppe de propriétés du matériau composite

Cette méthode, si elle était efficace pour les matériaux monolithiques, se révèle assez fastidieuse tant les possibilités de réaliser un composite sont nombreuses. Il semble donc que le fait de balayer tout le spectre des matériaux monolithiques, qui était l'avantage de cette méthode, soit plus pénalisant lorsqu'il s'agit de concevoir un composite.

Ce problème peut être contourné en utilisant les algorithmes génétiques qui permettent de se diriger vers une solution sans avoir à passer en revue tous les matériaux [Le Riche, 1998]. Leur principe est simple et basé, comme leur nom l'indique, sur les mécanismes de la génétique. Tout d'abord, il faut représenter un composite sous forme de vecteur contenant tous ses attributs (renfort, matrice, fraction volumique de renfort, empilement...). L'algorithme génère de façon aléatoire une population de base qui évolue grâce aux processus de croisement, de mutation et de reproduction. Ainsi, les composites sont évalués par rapport au cahier des charges, et seuls les "individus" dont les performances sont les meilleures sont conservés. Le résultat obtenu a toutefois une valeur relative puisqu'il dépend du choix de la population de départ.

Une autre approche consiste à définir le composite non plus en prenant ses attributs en un seul bloc, mais au contraire en se plaçant successivement aux différentes échelles de définition d'un composite [Guillemot, 2000] :

- (1) échelle microscopique : choix de la matrice, formulation
- (2) échelle mésoscopique : définition du pli unitaire, nature du renfort
- (3) échelle macroscopique : stratification, ordonnancement des couches
- (4) échelle de la structure : concepts, géométrie
- (5) outillages : modularité, fiabilité dimensionnelle

Cette approche, même si elle présente l'avantage de ne pas être soumise au fonctionnement de l'algorithme comme précédemment, est par contre assez contraignante. En effet, elle nécessite de pouvoir prévoir les propriétés du composite à chacune des étapes. Pour cela, il faudra définir un cahier des charges très rigoureux pour chacun des attributs à définir à chaque phase, en étudiant leur influence sur le résultat global, c'est à dire sur les propriétés du composite finalement obtenu.

## 1.5 Conclusion

La description des méthodes de sélection de matériaux qui vient d'être effectuée montre clairement qu'elles ne sont pas adaptées aux multimatériaux. En effet, il apparaît que ces méthodes se prêtent mal à la résolution de problèmes qui présentent soit une multiplication des fonctions pour une pièce, soit des incompatibilités entre des demandes, alors que ces deux particularités sont les causes les plus fréquentes de l'utilisation de multimatériaux.

Pour tenter de mettre en place une méthode et visualiser les problèmes qui peuvent se poser pendant le processus de conception, une étude de cas est menée. Plus que le produit qui en ressortira, le but de ce travail est de se confronter à un cas concret de problème de conception ne comportant pas de solution triviale, imposant donc la création d'une combinaison originale de matériaux.

Dans ce cadre, l'étude des méthodes de conception permet de disposer de principes de base, de modes de fonctionnement généraux qui sont susceptibles d'être adaptés à la conception de multimatériaux et la connaissance méthodologique de la sélection de matériaux pourrait être utilisable pour le choix des constituants de multimatériaux.

# Références bibliographiques

**Ashby M.F.**, Materials selection in conceptual design, *Materials Science and Technology*, Vol. 5, pp. 517-525 (1989)

**Ashby M.F.**, Materials and shape, *Acte Metallica Materiala*, Vol.39, No. 6, pp. 1025-1039 (1991)

**Ashby M.F.**, Criteria for selecting the components of composites, *Acta Metallica Materiala*, Vol. 41, No. 5, pp. 1313-1335 (1993)

**Ashby M.F.**, Multi-objective optimization in material design and selection, *Acta Materiala*, Vol. 48, pp. 359-369 (2000)

**Bader M.G.**, Materials and process selection for cost-performance effective laminates, *Proceedings of ICCM-11*, Vol. I, pp. 621-629 (1997)

**Boothroyd G.**, Product design for manufacture and assembly, *Computer Aided Design*, Vol. 26, pp. 505-520 (1994)

**Bréchet Y., Ashby M.F., Dupeux M., Louchet F.**, Choix et usage des matériaux, *Techniques de l'ingénieur*, T5 100, pp1-23 (1997)

**Bréchet Y., Ashby M., Salvo L.**, Sélection des matériaux et des procédés, *Presses Universitaires de Lausanne* (2000)

**Cavallucci D.**, TRIZ : l'approche altshullerienne de la créativité, *Techniques de l'ingénieur*, A5 211, pp.1-18

**Cavallucci D., Lutz P.**, Intuitive design method (IDM), a new approach on design methods integration, *Proceedings of ICAD 2000* (2000)

**Dessarthe A.**, Conception de pièces mécaniques en plastique et composite, *Publications CETIM* (1996).

**Domb E.**, QFD and TIPS/TRIZ, *Triz journal*, juin 1998, <http://www.triz-journal.com/> (1998)

**Gogu G.**, Méthodologie d'innovation : la résolution de problèmes créatifs

**Govers C.P.M.**, QFD not just a tool but a way of quality management, *International Journal of Production Economics*, Vol. 69, pp. 151-159 (2001)

**Govers C.P.M.**, What and how about quality function deployment (QFD), *International Journal of Production Economics*, Vol. 46-47, pp. 575-585 (1996)

**Guillemot J.M., Grunevald Y.H.**, Les composites pour structures ferroviaires : nécessité d'une nouvelle approche, *Mécanique et Industries*, Vol. 1, pp. 223-234 (2000)

**Hsiao S.W.**, Concurrent design method for developping a new product, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 29, pp. 41-55 (2002)

**Kim J.K., Han C.H., Choi S.H., Kim S.H.**, A knowledge-based approach to the quality function deployment, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 35, No. 1-2, pp. 233-236 (1998)

**Kunjur A., Krishnamurti S.**, A robust multi-criteria optimisation approach, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 32, No. 7, pp. 797-810 (1997)

**Kuo T.C., Huang S.H., Zhang H.C.**, Design for manufacture and design for "X" : concepts, applications and perspectives, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 41, pp. 241-260 (2001)

**Landru D.**, Aides informatisées à la sélection des matériaux et des procédés dans la conception de pièces de structure, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (2000)

**Landru D., Bréchet Y., Salvo L.**, Materials and process selection, an integrated approach, Proceedings of Euromat 2001 (2001)

**Le Riche R., Gaudin J.**, Design of dimensionally stable composites by evolutionary optimization, Composite Structures, Vol. 41, pp. 97-111 (1998)

**Lovatt A.M., Shercliff H.R.**, Manufacturing process selection in engineering design. Part 1 : the role of process selection, Materials and Design, Vol. 19, pp. 205-215 (1998)

**Lovatt A.M., Shercliff H.R.**, Manufacturing process selection in engineering design. Part 2 : a methodology for creating task-based process selection procedures, Materials and Design, Vol. 19, pp. 217-230 (1998)

**Sayettat C., Devalan P.**, Les besoins des entreprises de l'industrie mécanique en matière d'ingénierie mécanique, Mécanique et Industries, Vol. 1, pp. 5-14 (2000)

**Sunar M., Hyder S.J., Yilbas B.S.**, Robust design of piezoelectric actuators for structural control, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 190, pp. 6257-6270 (2001)

**Terninko J.**, The QFD, TRIZ and Taguchi connection : customer-driven robust innovation, The Ninth Symposium on Quality Function Deployment (1997)

**Terninko J.**, Selecting the best direction to create the ideal product design, Triz journal, juillet 1998, <http://www.triz-journal.com/> (1998)

**Weaver P.M., Ashby M.F.**, The optima selection of material and shape, Journal of Engineering Design, Vol. 7, No. 2, pp. 129-150 (1996)

**Weaver P.M., Ashby M.F.**, Material limits for shape efficiency, Progress in Materials Science, Vol. 41, pp. 61-128 (1997)

**Wilson J.R., Grey-Taylor S.M.**, Simultaneous engineering for self-directed work teams implementation : A case study in the electronics industry, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 16, pp. 353-365 (1995)

**Zanin J.P.**, Cahier des charges fonctionnel, Techniques de l'ingénieur, A5 090, pp. 1-6

# Chapitre 2 : Conception d'un multimatériaux

Plutôt que de chercher à adapter les méthodes de conception qui ont été abordées au chapitre précédent, nous nous proposons pour définir une méthode de conception de multimatériaux de partir d'une application. Cette étude de cas permettra ainsi de détecter quels sont les principes où les méthodes qui correspondent le mieux à ce domaine.

## 2.1 Proposition d'une démarche

Avant de proposer les grandes lignes d'une démarche de conception de multimatériaux, il convient de définir précisément ce que l'on qualifie de combinaison multimatériaux. Tout d'abord, le terme lui même qui induit les notions de combinaison et de matériaux, et par conséquent de structure, ce qui attire l'attention sur la notion d'échelle d'observation. En effet, dans certains cas comme les sandwichs, il est difficile de savoir s'il faut les considérer comme un multimatériaux ayant ses propriétés propres ou comme une structure constituée de plusieurs matériaux. Pour éviter ces problèmes, nous prendrons le parti dans cette étude de considérer comme multimatériaux toutes les combinaisons non homogénéisables et non démontables permettant par ailleurs la définition de propriétés comme on pourrait le faire pour un matériau homogénéisable.

Une précision fondamentale doit être ajoutée à cette définition pour que la notion de multimatériaux ne soit pas confondue au niveau de la conception avec un assemblage de pièces réalisées avec des matériaux différents : il est nécessaire de prendre en compte les interactions entre les constituants, leur agencement dont peuvent découler des propriétés que les matériaux ne possèdent pas séparément, et le procédé de mise en œuvre.

Les bases de la démarche à utiliser pour concevoir un produit multimatériaux nous paraissent devoir rester identiques à celles utilisables pour une pièce en matériau monolithique, puisque les fonctions de la pièce dictent toujours les orientations de la conception. Toutefois, lorsqu'il ne s'agit plus de sélectionner un matériau, mais de simultanément concevoir un multimatériau et ses conditions de mise en œuvre, l'un et l'autre étant à l'évidence intimement liés, la conception ne pourra se faire que pas à pas, donnant

donc à la méthode un caractère itératif qui n'est pas essentiel dans la conception d'une pièce (figure 2.1).

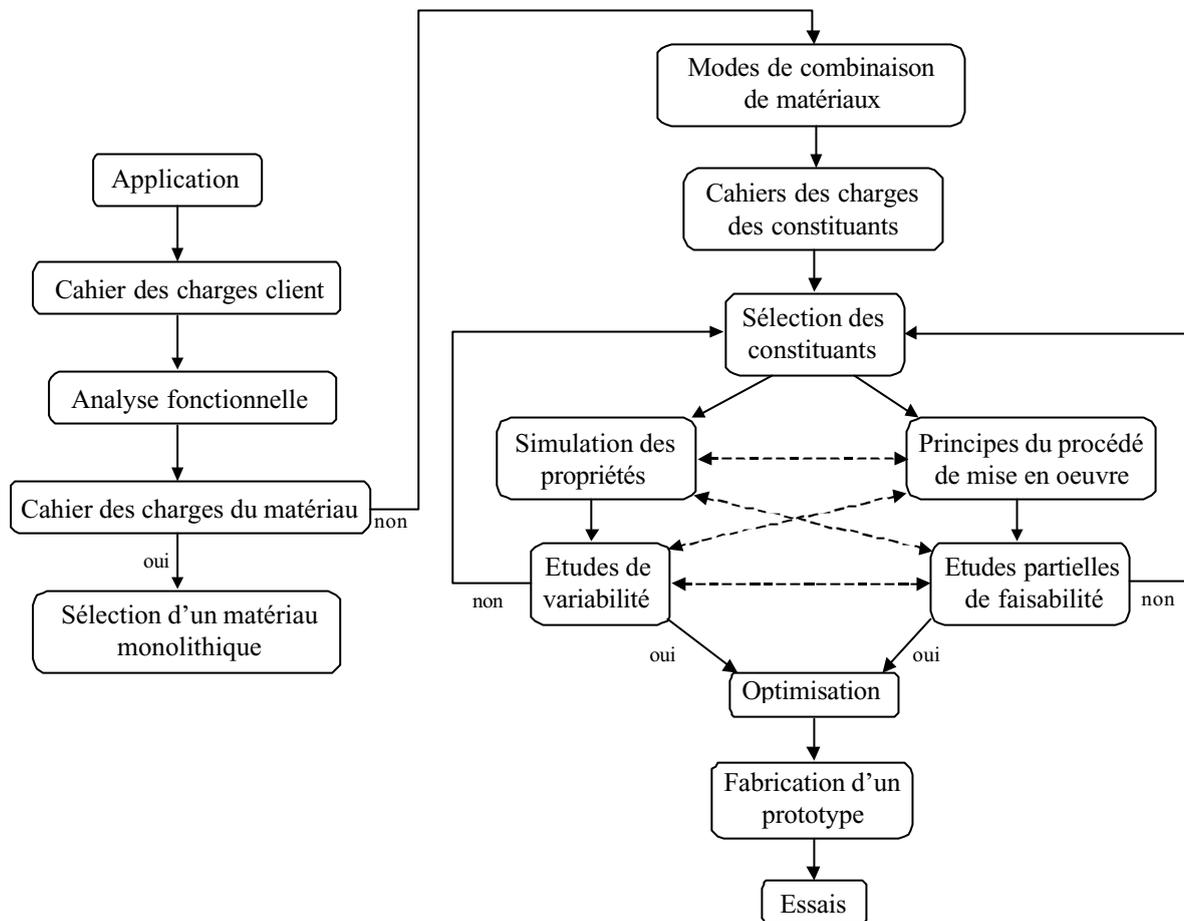


Figure 2.1 : Démarche de conception

Les premières étapes de la démarche sont par conséquent inchangées : d'une analyse du cahier des charges fonctionnel de la pièce, on déduit un (ou plusieurs) cahier des charges du matériau. Ce travail débouche, dans le cas où les matériaux monolithiques ne peuvent donner satisfaction, sur la conception d'un multimatériaux qui doit impérativement inclure la définition d'un procédé de mise en œuvre.

Ensuite, les propriétés du matériau et le comportement global de la structure doivent être prédits dans un premier temps à l'aide de modèles simples. Si ces propriétés ne donnent pas entière satisfaction, la conception de la structure ou du matériau devra être modifiée, ainsi éventuellement que le procédé de fabrication. Les évaluations des propriétés sont à nouveau effectuées, et ce jusqu'à ce que la solution proposée satisfasse le cahier des charges "matériau" de la structure.

Une fois cette structure définie, son dimensionnement et ses conditions de mise en œuvre peuvent être affinées grâce à des méthodes d'optimisation, qui conduiront donc à des valeurs plus précises et prenant en compte d'éventuelles variations ou incertitudes sur les différentes étapes de la mise en œuvre, ou conditions de couplages des différents constituants.

Les premières vérifications du bon comportement de la structure sont des simulations numériques, dont les résultats, comme auparavant pour les prédictions, pourront remettre en cause les étapes précédentes de la conception.

La fin de la méthode consiste à réaliser des prototypes et des essais de façon à valider le travail effectué par rapport au cahier des charges, en modifiant si nécessaire les conditions de mise en œuvre, ou même en remettant en cause le choix de la solution, et répéter toutes les étapes qui suivent.

## **2.2 Etude de cas : conception d'un multimatériaux pour réservoir**

Notre étude concerne la conception d'un réservoir destiné au transport de matières énergétiques. Le cahier des charges fourni par le CEA doit permettre l'application de la démarche décrite précédemment. Pour cela, les caractéristiques demandées pour le réservoir ont été choisies de telle sorte que l'étude puisse garder un caractère général, et ne se concentre pas sur un problème trop spécifique à cette application.

### **2.2.1 Cahier des charges du réservoir**

Comme l'organigramme précédent l'a montré, il est nécessaire de détailler préalablement le cahier des charges fonctionnel. En effet, l'étude consistant à intégrer les fonctions de la pièce dans le matériau, le cahier des charges du matériau est obligatoirement déduit du cahier des charges fonctionnel du réservoir.

#### **2.2.1.1 Définition des fonctions**

Le cahier des charges peut être divisé en deux parties, puisque certaines caractéristiques sont usuelles pour un réservoir, alors que d'autres sont propres à ce domaine

d'application. Dans un premier temps, il est impératif d'énumérer l'ensemble de ces fonctions ou contraintes.

Les caractéristiques demandées sont :

- (1) forme cylindrique, avec les proportions  $L=2\phi$  où  $L$  est la longueur du cylindre et  $\phi$  son diamètre, pour un volume de 5 l,
- (2) épaisseur maximale de paroi : 10 mm,
- (3) masse inférieure à 5 kg,
- (4) matière contenue : nitrométhane,
- (5) température d'utilisation entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $+70^{\circ}\text{C}$  à l'intérieur du réservoir,
- (6) tenir une pression interne de 20 bars pendant 720 s (tests pratiqués à 30 bars),
- (7) étanchéité.

Le cahier des charges comprend ensuite d'autres exigences qui correspondent à des fonctions propres à ce type de réservoir. La première de ces propriétés est l'isolation thermique, car de trop fortes variations de température pourraient endommager l'explosif. Il faut donc éviter que la température de l'explosif ne descende en dessous de  $-20^{\circ}\text{C}$ , même lors d'une exposition à  $-70^{\circ}\text{C}$  pendant 8 heures avec une température initiale de  $-10^{\circ}\text{C}$ .

En plus de cela, le réservoir a un rôle à jouer dans la protection vis-à-vis des agressions accidentelles. Le but de cette protection est d'éviter toute réaction violente du nitrométhane, ainsi qu'une explosion pneumatique du réservoir lors d'agressions thermiques comme les incendies.

Les autres agressions auxquelles sera confronté le réservoir sont les agressions mécaniques. Il devra ainsi résister à une chute de 5 m sans perte d'étanchéité, et éviter qu'une détonation ne se produise lors d'un impact par un projectile d'acier de 4 g à 1500 m/s. Notons que la résistance à la perforation n'est pas ici considérée comme un des critères du cahier des charges. Ces tests seront simplement pratiqués en fin d'étude afin de caractériser le comportement du réservoir.

### **2.2.1.2 Classement des fonctions**

Une fois que l'ensemble des fonctions et contraintes relatives au réservoir ont été définies, elles peuvent être ordonnées de façon logique (figure 2.2) en montrant les relations qui existent entre elles. On parvient donc à mettre en évidence une fonction de base et des fonctions de rang moins élevé qui en découlent.

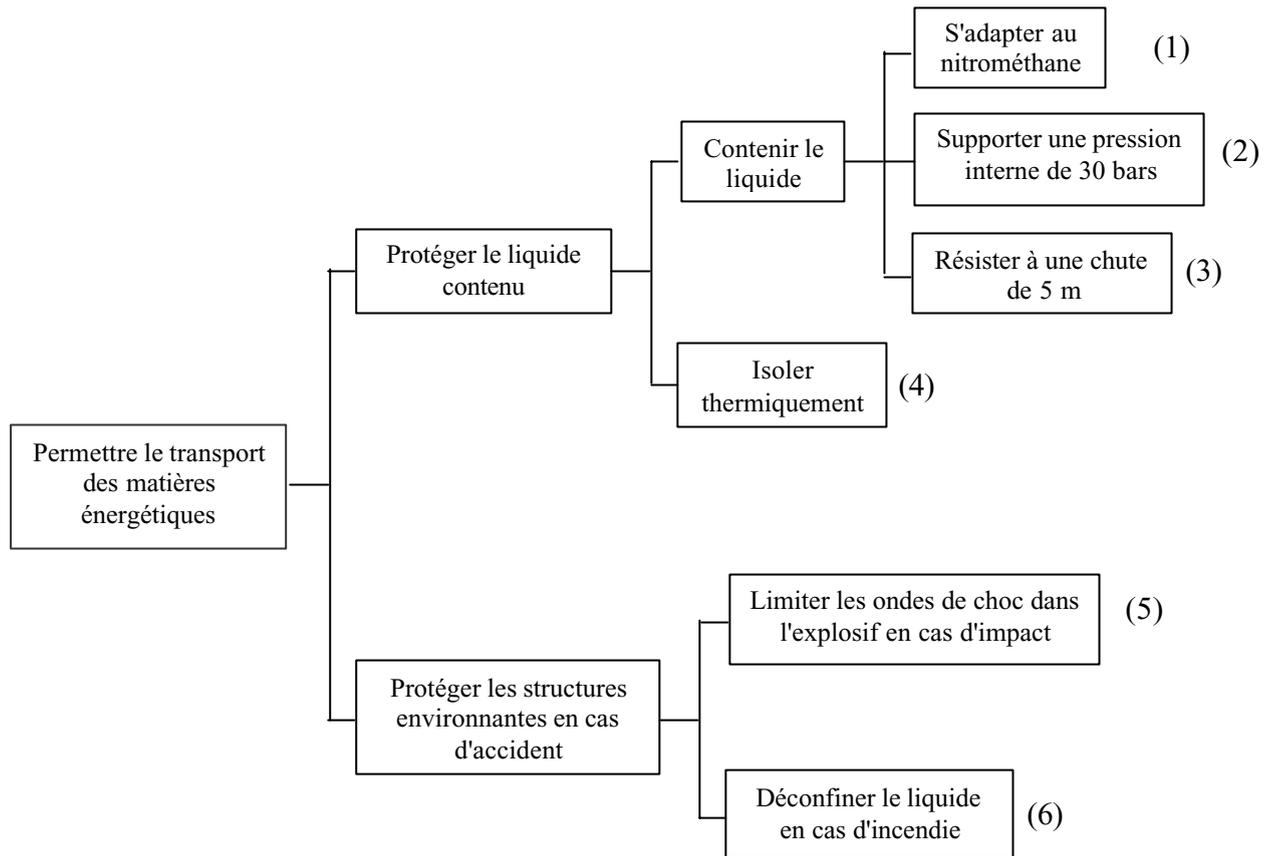


Figure 2.2 : Classement des fonctions

Le cahier des charges fonctionnel peut être résumé dans un tableau présenté en annexe 1.

## 2.2.2 Analyse du cahier des charges fonctionnel

Cette partie du travail est très importante dans la recherche d'intégration des fonctions au sein du matériau. En effet, en analysant ce cahier des charges fonctionnel, il est possible de construire un cahier des charges du matériau puisque chaque fonction ou contrainte du réservoir doit pouvoir être traduite en une exigence au niveau du matériau :

(1) compatibilité avec le contenu : pour rester étanche pendant toute la durée de vie du réservoir, le matériau ne doit pas être réactif avec le nitrométhane, ne pas être sensible à la corrosion. Toutefois, dans le cas où il ne remplirait pas ces conditions, cette fonction pourrait être assurée par un liner, ce qui revient déjà à une première combinaison de matériaux.

(2) résistance mécanique : la pression interne va engendrer un état de contrainte biaxial dans le matériau. En effet, on trouve dans la paroi une contrainte

circonférentielle  $\sigma_{\theta\theta}$  et une contrainte axiale  $\sigma_{zz}$  due à la présence des fonds, dont les valeurs

$$\text{sont } \sigma_{\theta\theta} = \frac{Pr}{e} = 21\text{MPa} \quad \text{et} \quad \sigma_{zz} = \frac{Pr}{2e} = 10,5\text{MPa} .$$

(3) résistance à une chute : la sollicitation mécanique correspondante à la chute du réservoir d'une hauteur de 5 m étant très complexe, il paraît difficile de définir une propriété du matériau permettant de satisfaire cette fonction. Elle ne peut donc être prise en compte que de manière intuitive lors de la conception, mais fera l'objet de vérifications expérimentales en fin d'étude.

(4) isolation thermique : on peut calculer à partir du critère du cahier des charges une valeur maximale de la conductivité thermique à obtenir en comparant la quantité de chaleur minimale sortante en 8 heures, et la quantité de chaleur nécessaire pour faire baisser la température de l'explosif de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $-20^{\circ}\text{C}$ .

La conductivité thermique maximale admissible de  $7.10^{-4}$  W/mK obtenue par ce calcul ne semble pas pouvoir être atteinte puisque celles des isolants les plus performants se situent plutôt autour de 0,02 W/mK. La fonction d'isolation thermique ne pourra donc pas être satisfaite dans les termes exacts du cahier des charges. Toutefois, elle est prise en compte dans la conception puisque l'on essaiera de la minimiser.

(5) résistance au choc : pour pouvoir satisfaire la fonction de protection par rapport aux chocs, la paroi va devoir les rendre inoffensifs vis-à-vis de l'explosif. Le principal danger dans un tel cas est qu'une onde de choc se forme, et traverse l'explosif, ce qui aurait pour conséquence de donner naissance à une détonation. Cela ne peut être évité que par une atténuation de la pression de choc, une augmentation du temps de montée en pression, ou la déstructuration du choc en un choc rampant ou multiple. En revanche, le bon comportement d'un matériau concernant cette fonction peut difficilement être quantifié. Les seuls renseignements concernant les solutions seront donc dans un premier temps qualitatifs, puis pourront être précisés par la suite grâce à des logiciels de simulation.

(6) protection en cas d'incendie : la fonction de déconfinement impose à la paroi de ne pas présenter de résistance mécanique ou de perdre son étanchéité à partir d'une température de l'ordre de  $150^{\circ}\text{C}$ . Ainsi, la montée en pression du nitrométhane n'aura pas le temps de se faire, puisque dès un niveau faible, son expansion ne sera plus arrêtée par la paroi, et il s'écoulera sans provoquer d'explosion. En utilisant la courbe de vaporisation du nitrométhane [Jaubert], et en négligeant les effets de la convection, tendant à uniformiser la température du liquide, on peut estimer à trois minutes le temps imparti au déconfinement pour s'opérer (voir annexe 3).

En plus de cela, les contraintes du cahier des charges fonctionnel imposent au matériau de présenter une masse volumique inférieure à  $3,8\text{g/cm}^3$ , de permettre la fabrication en série de la structure, et d'avoir un coût aussi réduit que possible.

### **2.2.3 Sélection de matériaux**

Après avoir établi ce cahier des charges, il faut dans un premier temps rechercher une solution simple utilisant un matériau monolithique. Ensuite, si cette recherche ne donne pas de résultat satisfaisant, la conception s'orientera vers les multimatériaux.

La méthode de sélection de matériaux monolithiques présentée au chapitre 1 peut facilement être mise en pratique grâce au logiciel CES [Cebon, 2001]. Celui-ci permet de procéder à une étude en opérant soit graphiquement, en utilisant les cartes de propriétés adaptées, soit numériquement en filtrant directement les résultats en fonction des contraintes qui lui sont définies.

Le cahier des charges établi pour le réservoir montre un nombre important de fonctions, qui sont plus ou moins faciles à évaluer de manière objective. Le problème peut donc être abordé de différentes manières.

Dans un premier temps, il paraît intéressant de focaliser l'étude sur la fonction de déconfinement alliée à la faculté de subir une pression de 30 bars dans les conditions normales d'utilisation. La carte de propriétés représentant la température de fusion et la limite d'élasticité du matériau est donc tracée (figure 2.3). Vu les contraintes posées par le cahier des charges dans chacun des cas, un filtrage est réalisé en ne conservant que les matériaux dont la limite d'élasticité est supérieure à 20 MPa et dont la température de fusion est comprise entre 70 et 150 °C.

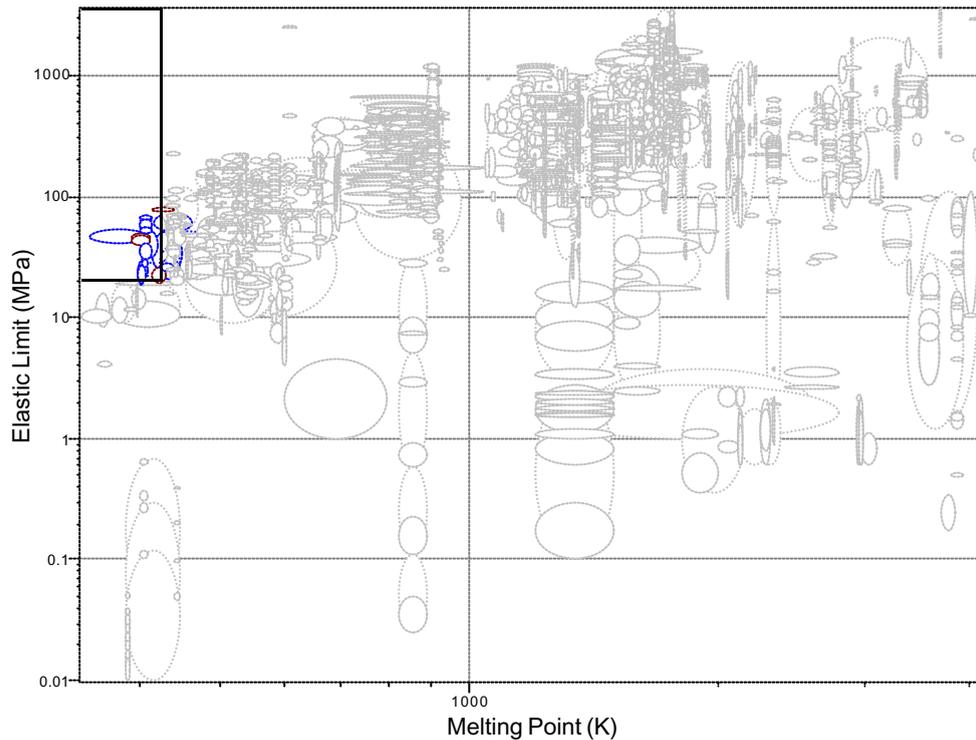


Figure 2.3 : Carte de sélection pour la température de fusion et la limite d'élasticité

Ce premier filtrage nous donne un total de 25 solutions qui sont présentées en détail au tableau 2.1. On constate que si une solution existe, elle se trouvera certainement dans le domaine des polymères thermoplastiques.

Matériaux	Température de fusion (K)		Limite d'élasticité (MPa)	
Acrylonitrile	400	416	49.3	68.8
Acrylonitrile (Extrusion)	400	416	62.4	68.8
Acrylonitrile (High-impact Extrusion)	400	416	49.3	54.3
Acrylonitrile (Injection Molding)	400	416	52	65
Acrylonitrile (Molding and Extrusion)	400	416	49.3	54.3
CA Butyrate (Molding)	405	421	31	52.4
Cellulosic	400	518	24.8	52.4
EC (Molding Compound)	400	416	30	40
EVOH (unfilled)	415	464	50.9	71.6
High density PE	398	411	17.9	31
PE (20-30% Long Glass Fibre, High Density)	393	413	38.64	46.88
PE (30% Glass Fibre, High Density)	393	413	41.36	49.68
PE (High Density, High Molecular Weight)	398	408	19.3	26.9
PE (High Density, Homopolymer)	403	410	26.2	31
PE (High Density, Low/Medium Molecular Weight)	398	405	17.9	29
PE (High Density, Ultra High Molecular Weight)	398	411	21.4	27.6
PE - Glass Filled	393	413	38.64	49.68
PP (10-40% Talc Filled, Copolymer)	414	431	19.3	26
PP (Copolymer)	423	448	20.7	29.6
PP (Impact Modified, Copolymer)	423	441	24	27.6
PUR (Molding)	348	410	40	53.8

PVDF	414	451	23	50
PVDF (30% PAN Carbon Fibre)	414	440	73.52	81.12
PVDF (Molding and Extrusion)	414	451	23	50
Polypropylene	423	448	20.7	37.2

Tableau 2.1 : Résultat de la sélection en fonction de la limite d'élasticité et de la température de fusion

En plus de ces deux fonctions, celle concernant l'isolation thermique paraît aussi importante, et de plus, peut être évaluée de manière objective par la conductivité thermique de matériau. La deuxième carte de propriétés qui est tracée concerne donc la limite d'élasticité et la conductivité thermique (figure 2.4). Cette carte est d'autant plus intéressante que généralement, les bons isolants thermiques ne possèdent pas de bonnes propriétés mécaniques, surtout s'il s'agit de mousses ou de matériaux poreux.

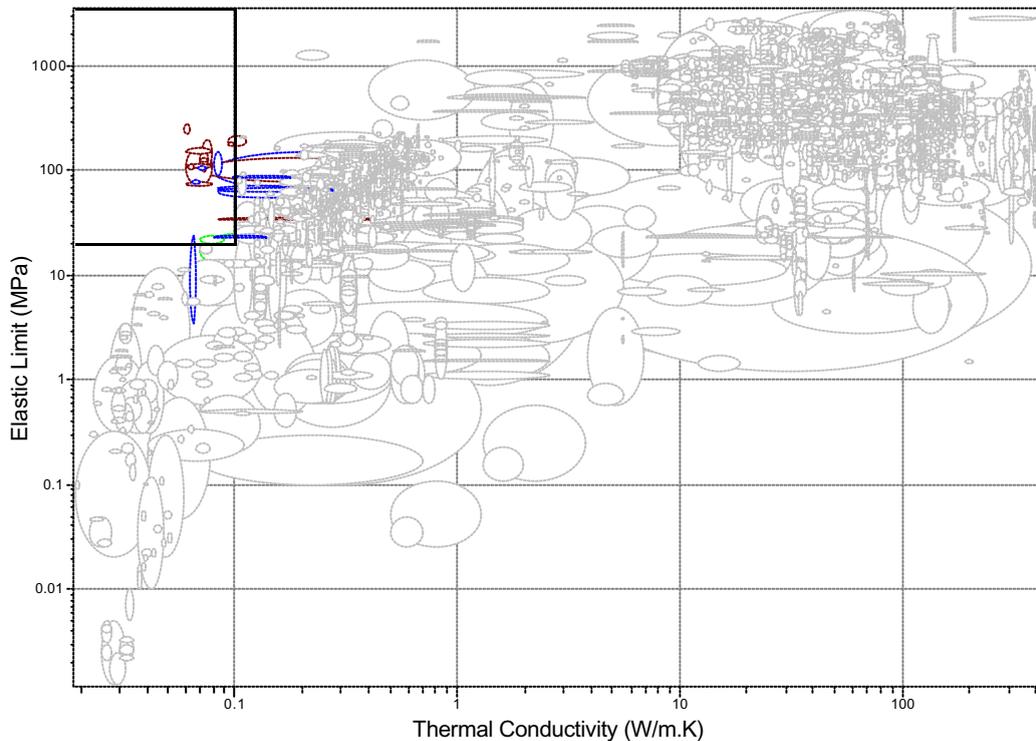


Figure 2.4 : Carte de propriétés pour la limite d'élasticité et la conductivité thermique.

Les limites fixées pour délimiter le champ des solutions sont ici de 20 MPa pour la limite d'élasticité et de  $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour la conductivité thermique. Les solutions, listées dans le tableau 2.2, sont cette fois à nouveau au nombre de 25.

Matériau	Conductivité thermique		Limite d'élasticité (MPa)	
	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )			
Acrylonitrile Butadiene Styrene Foam : Structural	0.07	0.09	20	24
Chlorosulfonated Polyethylene (CSM)	0.062	0.067	3.4	24
Epoxy SMC (Carbon Fibre)	0.0586	0.0628	220.8	276
Epoxy SMC (Glass Fibre)	0.0712	0.0795	110.4	192.8
Isoprene (IR) – unfilled	0.08	0.14	23	24
LCP – Glass Filled	0.06	0.08	71.44	165.6
Liquid Crystal Polymer	0.0805	0.5765	65.68	148.8
PBT (40% Long Glass Fibre)	0.0692	0.0749	120	132.8
PBT – Glass Filled	0.0692	0.4977	77.2	132.8
PEI (Unfilled)	0.0644	0.0697	73.52	81.12
PI (Unfilled)	0.0963	0.176	86.2	89.6
PMMA	0.0837	0.251	53.8	72.4
PMMA (Heat Resistant, Molding and Extrusion)	0.0837	0.188	65.7	72.4
PPS (Unfilled)	0.0837	0.289	64	67.2
Polyester Liquid Crystal (15% Glass Fibre)	0.06	0.08	147.2	162.4
Polyester Liquid Crystal (30% Glass Fibre)	0.0696	0.0753	93.6	165.6
Polyester Liquid Crystal (30% Glass Fibre, High HDT)	0.0612	0.0662	99.2	116
Polyester Liquid Crystal (40% Glass Fibre)	0.06	0.08	71.44	78.8
Polyester Liquid Crystal (Glass Fibre for SMT)	0.06	0.08	103.2	113.6
Polyester Liquid Crystal (Medium Melting Point)	0.0805	0.0871	88	148.8
Polyphthalamide (33% Glass)	0.0926	0.1001	168	185.6
Polyphthalamide (Unreinforced)	0.0684	0.074	99	109
Polyphthalamide – Glass Filled	0.0926	0.113	168	220
Structural Polymer Foam (0.58-0.86)	0.07	0.15	12	25
UF (Alpha Cellulose Filler)	0.0837	0.419	33	35

Tableau 2.2 : Résultat de la sélection en fonction de la limite d'élasticité et de la conductivité thermique

On constate que si ces points, pris deux par deux, peuvent conduire à des solutions, en revanche, l'intersection des deux ensembles de solutions est vide. Le cumul des deux filtrages montre donc l'absence de solutions dans le champ des matériaux monolithiques. Notons que le même type de filtrage peut être effectué en prenant en compte la ténacité du matériau, qui permettrait de traduire la capacité à répondre à la fonction de résistance aux chocs. Le résultat obtenu est identique puisqu'à chaque fois, le couplage de deux critères de sélection invalide toutes les solutions éventuelles.

Le cahier des charges du matériau, déduit du cahier des charges fonctionnel du réservoir, ne peut donc pas être satisfait par un matériau monolithique. Il met bien en évidence les limites des méthodes classiques face à un grand nombre de fonctions ou des fonctions incompatibles entre elles. Devant l'absence de solution simple, ce problème de conception doit donc naturellement être orienté vers les multimatériaux.

## 2.3 Conception de multimatériaux

A ce stade de l'étude, la méthode classique de résolution des problèmes de conception doit être laissée de côté. Les cahiers des charges du matériau qui a été déduit du cahier des charges fonctionnel de la pièce, constitue le point de départ de la conception du multimatériaux. En effet, le travail consiste ici à chercher des mécanismes qui, au sein d'un multimatériaux, permettent de satisfaire ce cahier des charges du matériau précédemment défini. Ce dernier devient donc un cahier des charges "fonctionnel" du multimatériaux.

Une des raisons pour lesquelles les recherches menées dans les bases de données de matériaux monolithiques ont échoué est certainement la multiplicité des fonctions du réservoir. Pour contourner ce problème, il est possible de découpler ces fonctions en leur attribuant chacune une partie de l'épaisseur de la paroi.

Pour effectuer une recherche de solutions, deux méthodes sont possibles. En effet, les différents thèmes abordés dans le cahier des charges peuvent être traités les uns après les autres, le champ des solutions se réduisant à chaque fois par élimination. L'autre approche, proposée par Pahl et Beitz, consiste à rechercher des solutions pour chacun en même temps, puis à les recouper entre elles pour retenir finalement celle qui semble la plus adaptée à l'ensemble du cahier des charges (voir figure 2.5). Le but de cette opération de recouplement est d'atténuer un défaut de cette approche, qui est de tendre vers des solutions assez complexes.

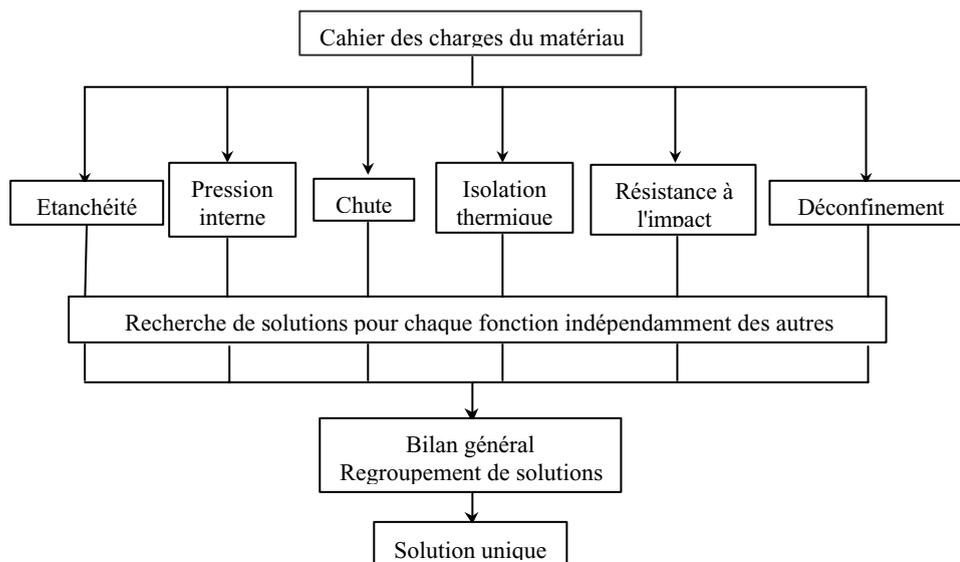


Figure 2.5 : Démarche utilisée pour la recherche de solutions

C'est au cours de cette étape de regroupement de solutions qu'intervient la notion de combinaison. En effet, plutôt que d'imaginer simplement une paroi multicouche dans laquelle les constituants trouvés pour assurer chacune des fonctions sont associés par empilement, on peut chercher à coupler avantageusement un plus petit nombre de constituants. Ainsi, les fonctions non satisfaites par les propriétés des constituants couplés seraient assurées grâce au mécanisme même du couplage. Considérons par exemple deux matériaux satisfaisant chacun une seule fonction du réservoir. Notre objectif serait ici de les disposer de telle sorte que le multimatériau obtenu remplirait une troisième fonction qu'aucun des deux constituants ne peut satisfaire seul. Dans un tel cas, la réponse au problème n'est plus fournie en terme de propriétés de matériaux mais grâce à une interaction entre les constituants.

Si une hiérarchie stricte n'a pas été définie entre les fonctions, il apparaît que celle qui va influencer le plus le choix des matériaux et dont le critère de validation réalisable expérimentalement et numériquement est le déconfinement. Ce point précis a donc fait l'objet d'une étude plus approfondie que les autres. Le travail a consisté à proposer tous les mécanismes possibles pour obtenir cette chute de propriétés.

## **2.3.1 Etude du déconfinement**

Dans un premier temps, les concepts susceptibles d'engendrer des solutions doivent être proposés et évalués. Ensuite, un choix devra être fait dans cette liste pour créer et définir un multimatériau capable de mettre en pratique au moins un de ces concepts.

### **2.3.1.1 Mécanismes de déconfinement**

#### *2.3.1.1.1 Chute des propriétés mécaniques*

Les mécanismes de déconfinement envisagés sont au nombre de trois. Dans un premier temps, il semble que le moyen le plus simple de provoquer un déconfinement réside dans une chute de résistance mécanique de la paroi. La solution la plus évidente consiste donc à trouver un matériau ayant un point de fusion ou de ramollissement à la température souhaitée. Ce matériau pourra ensuite former à lui seul la paroi, ou être un constituant d'un multimatériau.

### 2.3.1.1.2 Couplage fibre-matrice

Dans le cas d'un multimatériaux, cette chute de propriétés pourrait provenir d'une fissuration de la paroi due à des différences d'allongement à la rupture ou aux contraintes thermiques qui seraient induites lors d'une montée en température à cause d'une grande différence de coefficients de dilatation entre les constituants (figure 2.6).

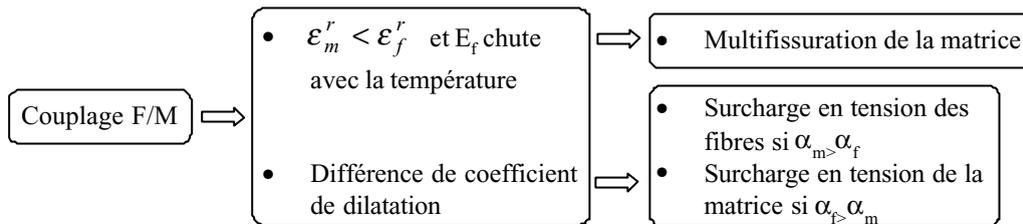


Figure 2.6 : Déconfinement provoqué par le couplage fibre / matrice

En effet, si à 150°C les fibres présentent un allongement à la rupture supérieur à celui de la matrice, elles pourraient se déformer sous l'effet de la pression interne. La matrice se trouverait alors surchargée et pourrait se multifissurer. On peut émettre des réserves quant à la pertinence d'un tel mécanisme car cela nécessiterait de trouver des fibres qui soient plus rigides que la matrice à basse température (pour que le renfort supporte le maximum d'efforts lorsqu'on applique la pression interne de 30 bars), et qui deviennent plus souples que la matrice à 150°C. De plus, il serait certainement difficile dans ce cas de supporter les 30 bars de pression interne qu'exige le cahier des charges.

La deuxième solution envisagée, utilisant toujours le couplage fibre-matrice, consiste à provoquer la rupture du matériau sous l'effet d'une différence de coefficient de dilatation thermique. Ainsi, lorsque la température augmente, si on choisit une matrice dont le coefficient de dilatation est largement supérieur à celui de la fibre, celle-ci sera mise en tension, entraînant ainsi sa rupture. Ce principe paraît assez séduisant car il repose sur la seule montée en température du matériau, et ne nécessite donc pas une pression interne très importante. De manière à évaluer le réalisme de ce mécanisme, on essaie d'estimer les déformations maximales d'origine thermique qui peuvent être obtenues, sachant qu'elles doivent rester inférieures aux déformations d'origine mécanique dues à la pression interne. Ainsi, on modélise la fibre et la matrice par un bilame symétrique (dont on ne considère que la moitié), avec deux corps homogènes et isotropes (figure 2.7).

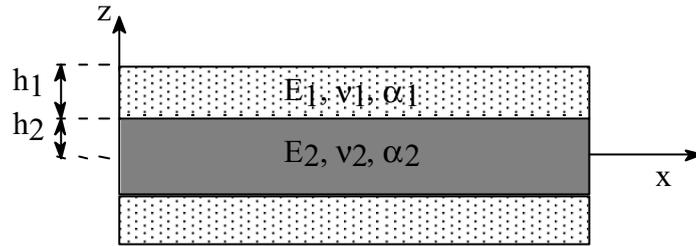


Figure 2.7 : Bimatériau considéré pour la modélisation

Les paramètres du modèle et l'intervalle qui leur est attribué sont :

- $E_1$  : module d'Young du matériau 1 variant de 80 à 400 GPa,
- $E_2 / E_1$  : rapport des modules d'Young variant de 0,175 à 2,5
- $h_2 / h_1$  : rapport des hauteurs variant de 0,5 à 2
- $\Delta\alpha$  : différence de coefficient de dilatation variant de  $3 \cdot 10^{-6}$  à  $5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

On recherche la valeur maximale des déformations thermiques sur les intervalles considérés, en imposant que la déformation thermique reste supérieure à la déformation mécanique correspondant à une pression interne de 30 bars. Les résultats obtenus montrent que même dans le cas le plus favorable, la déformation thermique reste très faible, puisqu'elle ne dépasse pas 0,5%, ce qui semble insuffisant pour entraîner la rupture du réservoir.

#### 2.3.1.1.3 Création d'ouvertures

Enfin, en utilisant le fait que le déconfinement peut aussi se produire grâce à une perte d'étanchéité, une structure dans laquelle des ouvertures apparaîtraient pourrait être conçue, ces ouvertures étant créées par exemple par des réactions chimiques thermiquement activées entre les constituants ou grâce à des poches de solvant réparties dans la paroi. Les difficultés liées à la mise en œuvre d'une telle structure semblent toutefois les rendre inadaptées à notre étude, d'autant plus qu'elle serait certainement vouée à la seule fonction de déconfinement.

#### 2.3.1.2 Recherche de solutions

Sur les trois mécanismes de déconfinement répertoriés, le plus intéressant paraît être le premier, c'est à dire celui où le déconfinement s'effectue grâce à une chute des propriétés mécaniques de la paroi. En effet, les deux autres solutions proposées paraissent soit difficiles à fabriquer soit pas assez efficaces. Etant donné que la pression interne à la température de

déconfinement, qui doit provoquer le déconfinement, n'est que de 7 bars, cette dégradation des propriétés devra être importante et rapide. Les mécanismes permettant de l'obtenir sont de deux types : les transformations d'ordre physique, telles que la fusion ou la transition vitreuse dans les polymères thermoplastiques, et les transformations d'ordre chimique comme la dépolymérisation.

#### 2.3.1.2.1 Les polymères thermoplastiques

Au vu des cahiers des charges détaillés dans la partie précédente, il semble naturel de s'orienter vers l'utilisation de polymères thermoplastiques. En effet, ceux-ci rassemblent des qualités d'amortissement des chocs, d'isolation thermique, ainsi que des températures de fusion qui peuvent être assez basses, contrairement aux thermodurcissables.

Le ramollissement des polymères thermoplastiques se produit sur une plage de températures plus ou moins large, située aux environs de la température de transition vitreuse  $T_g$  du matériau considéré [Reyne, 1992]. L'intensité de ce ramollissement dépend de la nature du polymère. En effet, il est possible d'obtenir des polymères, dits cristallins, dont les chaînes sont arrangées avec une grande régularité, par opposition aux polymères amorphes, qui sont caractérisés par l'absence d'ordre moléculaire. Notons cependant que ces cas sont idéaux et que, dans la pratique, on parlera plutôt de taux de cristallinité, le matériau n'étant jamais parfaitement cristallin.

Le taux de cristallinité [Beland, 1990] est un facteur important à prendre en compte pour décrire le comportement en température du matériau (figure 2.8).

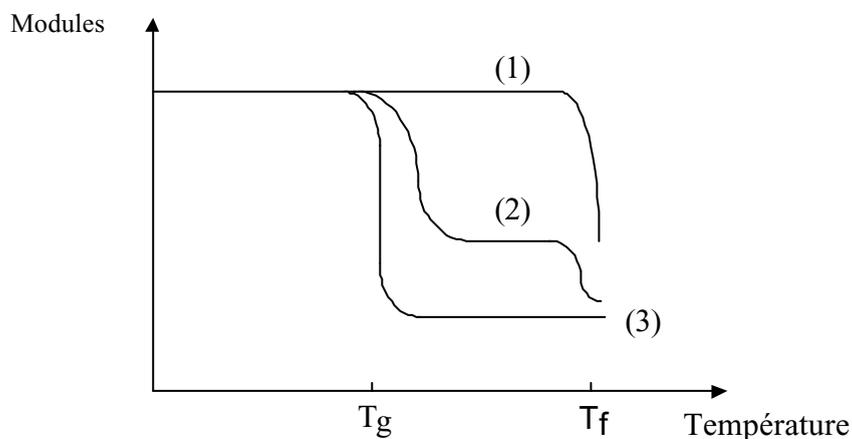


Figure 2.8 : Comportement d'un polymère : (1) cristallin, (2) semi-cristallin, (3) amorphe

En dessous de  $T_g$ , les propriétés du polymère sont peu sensibles aux différences de cristallinité, alors qu'au delà, un matériau amorphe s'affaiblit (il devient caoutchoutique) et voit ses propriétés diminuer. A des températures comprises entre  $T_g$  et  $T_f$  (température de fusion), un polymère semi-cristallin est donc constitué de parties cristallines rigides dispersées dans une matrice amorphe ramollie.

Il semble donc essentiel, dans le cadre de cette étude, de pouvoir maîtriser la microstructure du polymère puisque c'est un paramètre déterminant pour son comportement en température. Ainsi, une grande attention devra être portée aux facteurs susceptibles de modifier le degré de cristallinité pendant la mise en oeuvre, en particulier la température à laquelle le polymère est porté, la durée pendant laquelle il y est maintenu, et la vitesse de refroidissement. De plus, la microstructure peut varier à travers l'épaisseur de la structure (taux de cristallinité non uniforme), ou peut être affectée par la présence d'une surface étrangère (une fibre par exemple).

Si la microstructure conditionne la tenue en température du polymère, elle a aussi une grande influence sur ses caractéristique mécaniques. En effet, celles ci vont dépendre du degré de cristallinité, car il détermine le nombre et la taille des sphérolites (parties cristallines du polymère), qui ont la particularité d'être plus rigides, et moins ductiles que les zones amorphes du matériau.

#### 2.3.1.2.2 *Composites thermoplastiques*

Les propriétés mécaniques des polymères thermoplastiques n'étant en général pas très élevées, en particulier vis-à-vis de l'application considérée ici, il convient de s'orienter vers les polymères renforcés [Chretien, 1986] qui affichent de meilleures rigidités et résistances mécaniques.

Pour obtenir des composites à fibres courtes, on dispose de plusieurs méthodes comme le moulage par injection [Carlsson, 1990]. Ce procédé de fabrication consiste à disposer un mélange de fibre et de résine dans un moule adapté, et à découper la pièce souhaitée après solidification de l'ensemble. Il est également possible d'utiliser le moulage par compression, lors duquel les constituants sont introduits dans un moule chauffé placé dans une presse hydraulique ou l'extrusion qui est aussi une méthode très répandue et bien adaptée à la réalisation de cylindres.

En ce qui concerne les composites à fibres longues, outre les techniques de moulage par empilement ou de moulage par pultrusion, l'enroulement filamentaire semble être la méthode la plus adaptée pour réaliser des formes cylindriques. On dénombre trois types d'enroulements [Roychowdhury, 1991] :

- (1) un enroulement de fibres préalablement trempées dans un bain de matrice.  
Cette méthode est relativement peu utilisée car les grandes viscosités des matrices fondues empêchent un bon mouillage.
- (2) un bobinage de fibres seules sur un mandrin qui permet d'obtenir une préforme susceptible d'être ensuite imprégnée.
- (3) un enroulement de préimprégné.

Il existe plusieurs techniques pour obtenir des préimprégnés thermoplastiques [Iyer, 1991]. Tout d'abord, on peut utiliser une matrice en solution (mélangée à du solvant) pour imprégner la fibre. Ce solvant doit ensuite être entièrement retiré pour ne pas avoir de vides. Une méthode voisine de celle ci utilise des particules de matrice en suspension dans un liant vecteur de l'imprégnation. Un autre procédé consiste à imprégner la préforme fibreuse par le polymère fondu, à condition que sa viscosité ne soit pas trop élevée. On peut aussi effectuer une consolidation sous pression d'un empilement de couches de fibres (unidirectionnel ou tissus) et de couches de polymère. En revanche, cette voie n'autorise pas de faibles taux de résine. On peut aussi réaliser un cobobinage des fibres et de la matrice, ce qui permet en outre d'avoir une bonne drapabilité. Enfin, une préforme fibreuse peut être imprégnée par un thermoplastique sous forme de poudre, en chauffant afin de fritter les particules de poudre sur les fibres.

Pour la réalisation de ces composites, les fibres les plus couramment utilisées sont les fibres de verre, de carbone, mais aussi de polyéthylène ou de Kevlar dont les rigidités sont supérieures à celles du verre et qui présentent une bonne résistance aux chocs. Il faut noter que l'utilisation de la fibre de polyéthylène permettrait d'avoir un composite à fibres thermoplastiques, puisque sa température de fusion est proche de la température de 150°C fixée par le cahier des charges.

Cette analyse montre que les composites thermoplastiques semblent bien adaptés à la présente application qui nécessite une chute des propriétés mécaniques à 150°C.

### 2.3.1.2.3 *Dégradation des polymères*

Une des raisons pour lesquelles les polymères thermoplastiques paraissent intéressants pour cette application est la chute de leur propriétés mécaniques à des températures proches de celle stipulée par le cahier des charges du matériau. Cependant, il existe des phénomènes physiques différents de la fusion tels que la dépolymérisation capables de conduire aussi à un effacement du matériau sur le plan mécanique.

Les phénomènes de dégradation des polymères [Mercier, 1993] présentent des mécanismes communs, indépendamment de leur origine et de l'évolution ultérieure du matériau. Ainsi, la dégradation commence toujours par une rupture de liaison aussi appelée scission primaire. L'énergie nécessaire à cette coupure peut être de diverses origines : thermique, lumineuse, mécanique, chimique...

Un des mécanismes intervenant souvent dans la dégradation des polymères est la dépolymérisation, appelée ainsi car elle met en jeu des phénomènes très proches de ceux relatifs à la polymérisation. Ainsi après l'amorçage, scission généralement d'origine thermique ou photochimique, le mécanisme de dépropagation se met en marche. Son intensité est caractérisée par le nombre moyen de molécules de monomère produite par chaîne qui se dépropage.

Même si ce mécanisme semble intéressant, sa vitesse ne paraît pas appropriée à notre application, puisque la chute des propriétés serait ici trop progressive pour un déconfinement rapide.

### **2.3.1.3 Réalisation pratique des concepts**

Une fois les mécanismes élémentaires de déconfinement répertoriés et évalués, il faut imaginer des conditions permettant de les mettre en pratique.

A l'évidence, les conditions les plus simples consistent à utiliser le mécanisme choisi sur la paroi entière, en utilisant un des matériaux cités précédemment. Ainsi, il est possible d'envisager un réservoir constitué d'un polymère thermoplastique renforcé tel que le polyéthylène ou le polyacétal, capable de laisser fuir l'explosif au milieu du renfort fibreux sous l'effet de la montée en température et de la pression interne [Trotignon, 1996].

De même, un composite dont le renfort verrait ses propriétés chuter serait susceptible de se fissurer. Cela implique toutefois que la matrice choisie ne puisse pas supporter à elle seule la pression induite par le nitrométhane à 150°C, soit 4 bars. Parmi les fibres

thermoplastiques, seule la fibre de polyéthylène semble convenir, les autres, la fibre de Kevlar en particulier, conservant des résistances de l'ordre de 500 MPa à 150°C qui seraient trop élevées pour cette application.

La pression interne à 150°C étant relativement faible, il semble qu'une combinaison de ces mécanismes permettrait d'assurer le bon comportement du réservoir vis à vis du cahier des charges de départ, en offrant une multiplicité de mécanismes possibles. Le choix des matériaux pouvant réaliser cette solution est forcément restreint étant donné que les composites à fibre de polyéthylène sont assez peu développés. Le principal défaut de ces fibres étant la faiblesse de la liaison interfaciale avec la matrice, il est souvent nécessaire de procéder à des traitements de surface [Legeay, 1993] pour améliorer leur comportement, les plus efficaces pour ce type de fibre étant les traitements chimiques oxydants utilisant une solution d'acide chromique [Devaux, 1999a,b][Nardin, 1987]. De plus, dans le cas où la matrice est thermoplastique, il est impératif que sa température de fusion soit inférieure à celle de la fibre, ce qui empêche donc l'utilisation du polyacétal. La seule solution dans ce cas consiste donc en un composite à matrice polyéthylène renforcé par des fibres de polyéthylène [Marais, 1992][Shalom, 1997][Lacroix, 1997][Lacroix, 1999]. Leur principale qualité est qu'exceptionnellement, la liaison obtenue entre les fibres et la matrice est bonne, ce qui évite d'avoir à procéder aux traitements de surface.

Le point commun de ces structures est de présenter une paroi homogène, dans le sens où les constituants et la stratification sont les mêmes quel que soit l'endroit sur le cylindre. Suite à cela, on peut envisager des parois plus hétérogènes faisant intervenir un renforcement local. Ainsi, en reprenant le principe de la fusion de la matrice laissant apparaître une multitude d'espaces à travers le renfort, on peut imaginer un cylindre constitué d'une paroi alvéolaire. Cette option nécessiterait une augmentation de la largeur des parois des cellules, puisque dans cette application, les parois des alvéoles sont sollicitées en tension et non en flexion comme c'est le cas généralement pour ce type de structure. Les armatures des alvéoles supportant la plus grande partie des efforts appliqués, les alvéoles seraient alors remplies avec un polymère dont la température de fusion est proche de 150°C afin d'autoriser le déconfinement. Un problème subsiste toutefois quant au procédé d'élaboration d'un tel matériau. Il est cependant possible de l'éviter en utilisant une structure dont les alvéoles sont cette fois ci délimitées par des fibres bobinées [Tsai, 1996] constituant une grille de renforcement du réservoir.

Une autre solution consisterait à utiliser à nouveau une matrice fondant à 150°C, en réalisant une structure formée de deux demi-cylindres renforcés, avec sur le plan médian, une

zone non renforcée (figure 2.9). Une surépaisseur de matrice serait alors nécessaire à ce niveau afin d'éviter une rupture lors de l'application à froid des 30 bars de pression interne requis par le cahier des charges.

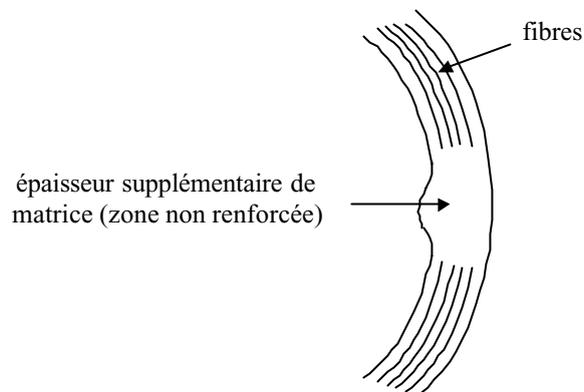


Figure 2.9 : Cylindre avec un plan médian non renforcé

Cette idée peut servir de point de départ pour imaginer d'autres structures car en allant plus loin dans cette voie, on peut imaginer deux demi-cylindres totalement disjointes cette fois ci (figure 2.10), et maintenues en appui face à face par des fibres dont les caractéristiques chutent à 150°C.

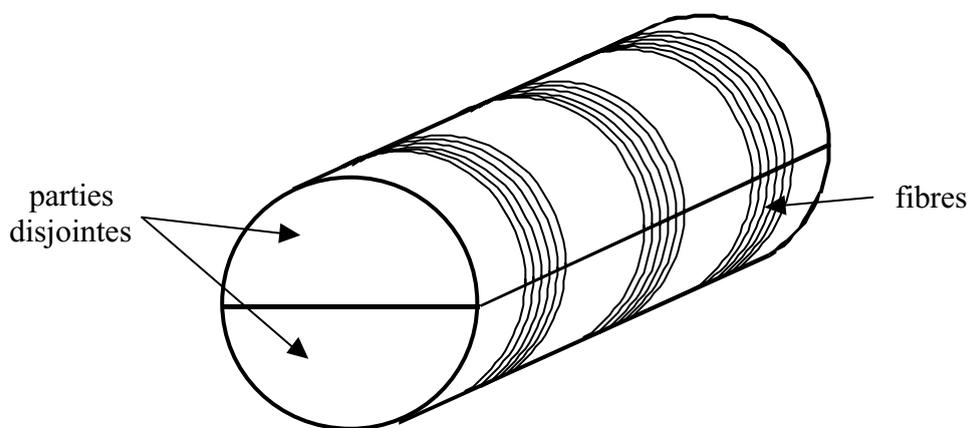


Figure 2.10 : Structure constituée de deux demi-cylindres

Une telle structure présente l'avantage de complètement découpler le déconfinement des autres fonctions qui pourraient ainsi être assurées par les deux demi-cylindres. Cette solution implique toutefois de parfaitement connaître le comportement de la fibre qui, de plus, doit être très rigide afin d'éviter des problèmes d'étanchéité susceptibles de se poser au niveau du plan de joint si les deux parties venaient à s'écarter sous l'effet de la pression interne.

L'analyse des mécanismes permettant de déconfiner lors d'une hausse de température ayant permis de proposer des conditions de mise en application, il faut maintenant étudier les autres fonctions et procéder de la même manière pour pouvoir enfin comparer les solutions obtenues.

## 2.3.2 Résistance à l'impact

Pour bien comprendre le rôle que l'on attend du réservoir, il est nécessaire de procéder à quelques rappels sur la formation des ondes de choc et le comportement des explosifs. Ensuite, connaissant ces principes, il sera possible de trouver des structures adaptées pour protéger le nitrométhane de ces agressions.

### 2.3.2.1 Chocs et explosifs

#### 2.3.2.1.1 Notion d'onde de choc

Une onde est la propagation dans un milieu matériel d'une perturbation de l'état et du mouvement de ce milieu [Thouvenin, 1985]. Si les perturbations provoquent des variations infiniment petites des grandeurs physiques, on dit que l'onde est sonique. Sa vitesse de propagation est alors celle du son dans le milieu considéré.

En général, une onde sonique ne se trouve pas isolée. En effet, les perturbations sont propagées dans le milieu par une succession d'ondes soniques. Or, la vitesse du son dans un milieu est très généralement une fonction croissante de la pression ou de la densité. Dans un train d'ondes soniques, chaque onde élémentaire aura donc tendance à rattraper celle qui la précède (figure 2.11), donnant ainsi naissance à une perturbation d'amplitude croissante.

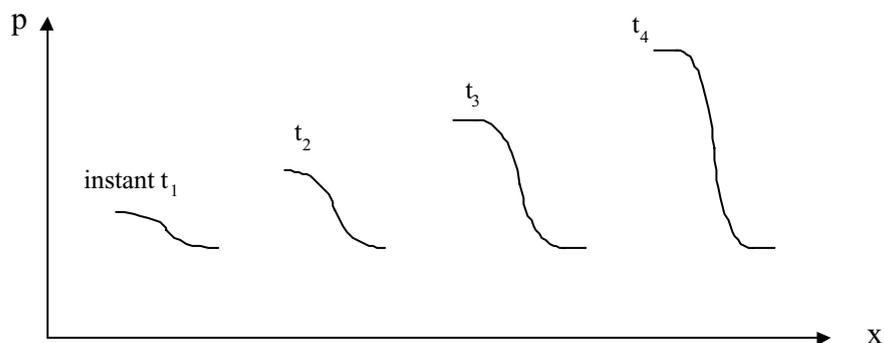


Figure 2.11 : Formation d'une onde de choc

Cela conduit donc à la formation d'une discontinuité de l'état du matériau appelée onde de choc, qui se propage dans ce dernier à une vitesse  $U$  comprise entre la vitesse du son dans le milieu qui la précède et celle dans le milieu qui la suit.

### 2.3.2.1.2 Polaire de choc

On considère qu'une onde de choc est caractérisée par sa vitesse par rapport au milieu initial et le saut de vitesse qu'elle propage (figure 2.12).

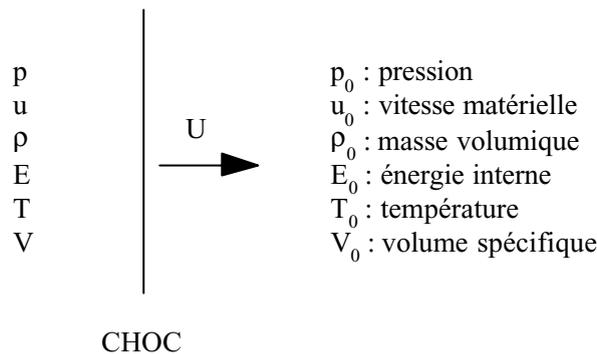


Figure 2.12 : Propagation d'une onde de choc

Les relations entre les grandeurs d'état (pression, densité, énergie interne, température...) et les grandeurs cinétiques s'écrivent à partir des trois principes fondamentaux de la mécanique que sont la conservation de la masse, la loi fondamentale de la dynamique, et la conservation de l'énergie. On obtient les relations suivantes :

- conservation de la masse :  $\rho_0 U = \rho(U-u)$
- loi fondamentale de la dynamique :  $p-p_0 = \rho_0 Uu$
- conservation de l'énergie (relation de Hugoniot) :  $E-E_0 = (p+p_0)(v_0-v)$

On appelle polaire de choc la courbe représentant la relation entre la pression et le saut de vitesse que propage l'onde de choc dans le milieu. Elle représente le lieu des états accessibles par choc dans le plan  $(p,u)$ .

Etant donné que l'on a une relation du type :

$$U = A + Bu$$

pour la plupart des solides et des liquides, et que la relation de Hugoniot nous donne, en négligeant  $p_0$  :

$$p = \rho_0 Uu$$

on en déduit que la polaire de choc pour les solides et les liquides est une parabole.

#### 2.3.2.1.3 *La physique des explosifs*

Les explosifs sont des matériaux pouvant réagir de trois manières suivant les sollicitations auxquelles ils sont soumis. Ces réactions diffèrent par leur violence et leur mode de propagation. En effet, la moins violente de ces réactions est la combustion. Elle se propage dans la matière par conduction thermique avec une vitesse de quelques mètres par minute. Dans le cadre de cette étude, ce type de réaction est recherché en cas d'incendie ou d'impact balistique car elle n'entraînerait pas une explosion du réservoir.

La déflagration est une réaction plus violente que la combustion, mais pas suffisamment pour être redoutée dans le cas du réservoir. Elle se propage par compression mécanique à une vitesse inférieure à 1 km/s.

En revanche, la détonation est une réaction qu'il faut impérativement empêcher dans le réservoir. En effet, se propageant par choc à des vitesses de l'ordre de plusieurs kilomètres par seconde, elle entraînerait une explosion du conteneur.

Soumis à des chocs de durée et d'intensité suffisantes, les explosifs peuvent produire un régime de détonation. Ce phénomène appelé transition choc-détonation (TCD) doit être évité en cas d'impact sur le réservoir. Son origine se trouve dans la microstructure de l'explosif [Belmas, 1992].

On considère des explosifs hétérogènes constitués de grains de matériaux énergétiques solidarisés à l'aide d'un liant assurant la cohésion mécanique de la composition explosive (figure 2.13). Ces matériaux, à la différence des explosifs homogènes, présentent de nombreux défauts microstructuraux (interfaces, inclusions de liant, pores...).

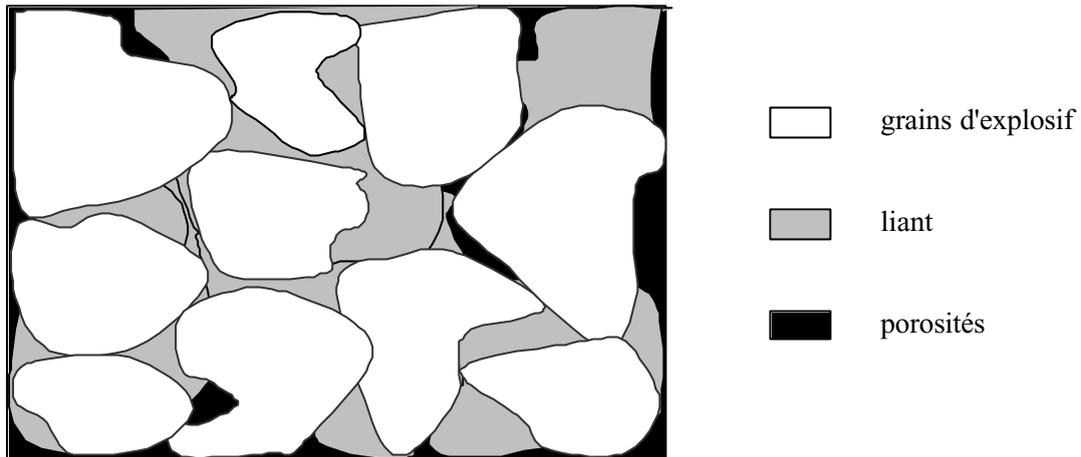


Figure 2.13 : Microstructure d'un explosif

Lors d'un choc, l'énergie ne se disperse pas uniformément dans le matériau mais se concentre sur des sites microscopiques. Sous l'effet du choc, des déformations viscoplastiques se produisent autour des pores microstructuraux en cours de fermeture, et vont engendrer une hausse de température. Si cette température atteint une valeur suffisante, les grains d'explosifs s'enflamment et une réaction de décomposition commence. Elle a pour effet de libérer des gaz, et donc d'augmenter la pression. La vitesse de combustion de l'explosif se trouve alors accrue, la décomposition et la montée en pression sont alors accélérées. Ainsi, une onde réactive se développe derrière le front de choc, le rattrape et l'absorbe.

La sensibilité d'une composition explosive ne dépend que du nombre et de la taille des porosités. En effet, la nature du gaz emprisonné dans ces porosités, ainsi que le liant utilisé n'influent pas sur la production d'une TCD.

### 2.3.2.2 Solutions pour le réservoir

Les rappels effectués montrent que pour éviter une explosion du réservoir, il faut empêcher qu'une onde de choc trop importante en amplitude et en durée ne se propage dans le nitrométhane. Les structures rendant une onde de choc inoffensive vis-à-vis de l'explosif seront donc généralement constituées de multimatériaux permettant une déstructuration de l'onde par de multiples réflexions aux interfaces et grâce à des différences entre les vitesses de propagation du son.

Dans un premier temps, on peut choisir de combiner plusieurs matériaux suivant l'épaisseur de la paroi. Les études menées par le CEA utilisant le logiciel de simulation 1D OCAPY ont montré qu'une alternance de couches de matériaux faiblement et fortement rigides altérerait les effets néfastes du choc.

Une autre conception consiste à utiliser plusieurs matériaux non plus dans l'épaisseur mais le long de la paroi. Notons cette fois-ci que la taille des hétérogénéités va être importante puisque la réponse au choc d'un composite est fortement dépendante de l'architecture de renforcement [Bibo, 1996] et de la vitesse d'impact. En effet, plus la vitesse de sollicitation sera importante, plus l'endommagement sera localisé car l'énergie transmise n'a pas le temps de se répartir sur toute la structure comme elle le fait dans le cas des basses vitesses. Une structure alvéolaire permettrait donc aussi de protéger l'explosif d'un choc accidentel à condition que la taille des alvéoles et les propriétés des constituants soient adaptés.

### **2.3.3 Isolation thermique**

L'analyse fonctionnelle a montré que la fonction d'isolation thermique telle qu'elle a été présentée dans le cahier des charges ne peut être remplie. Par conséquent, le matériau doit être choisi le plus isolant possible en prenant en compte les contraintes résultant du choix de la structure et du procédé de mise en œuvre qui lui est associé.

Les conductivités thermiques les plus basses qu'il est possible de trouver sont de l'ordre de  $0.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Parmi les isolants ayant de telles propriétés, ceux dont la manipulation est la plus facile sont les matériaux poreux à base de  $\text{SiO}_2$  et de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  qui ont des propriétés mécaniques faibles, mais sont assez peu friables pour cette classe de matériaux et peuvent être usinés sans problème.

### **2.3.4 Résistance à la pression, compatibilité, protection en cas de chute**

Les trois fonctions restantes ne font pas l'objet de recherches de solutions particulières comme les précédentes. En effet, la compatibilité avec le nitrométhane n'est pas réellement une fonction et est plutôt considérée comme une contrainte. Son étude ne consiste donc qu'en une vérification à partir de la solution proposée.

La chute d'une hauteur de 5 m est quant à elle trop complexe à simuler pour pouvoir entrer dans la conception autrement qu'en terme de vérification approximative et à l'aide de tests expérimentaux pratiqués en fin d'étude.

Enfin, la tenue à la pression interne de 30 bars entraîne un trop grand nombre de solutions pour être considérée seule comme l'ont été les précédentes fonctions. Elle sera donc elle aussi considérée comme une contrainte imposée au champ de solutions défini grâce à l'analyse des autres fonctions du réservoir.

## 2.3.5 Bilan

### 2.3.5.1 Choix de l'architecture du multimatériaux

Les solutions à chaque problème ont été énumérées suite à l'analyse des mécanismes permettant de satisfaire chaque fonction. Une fois ces recherches réalisées en parallèle, il faut les regrouper pour essayer de mettre en évidence des recoupements ou des redondances entre elles.

Sachant que la déstructuration des ondes de choc nécessite l'utilisation d'un multimatériaux, le champ global des solutions se trouve un peu restreint. Cette information permet de réduire le nombre de solutions intéressantes dans les structures autorisant le déconfinement du nitrométhane à 150°C. En effet, parmi elles, seules les structures alvéolaires de type nida ou grille composite semblent adaptées à la déstructuration du choc. Il est donc intéressant de s'orienter vers ce type de structure au moins pour une partie de la paroi, puisque les matériaux préconisés pour assurer le déconfinement ne sont pas forcément de très bons isolants thermiques. La partie alvéolaire ne représenterait donc pas la totalité de l'épaisseur de la paroi, laissant ainsi de la place pour les autres fonctions.

La partie restante de l'épaisseur pourrait donc être dévouée à l'isolation thermique de l'explosif grâce à la structure suivante (figure 2.14).

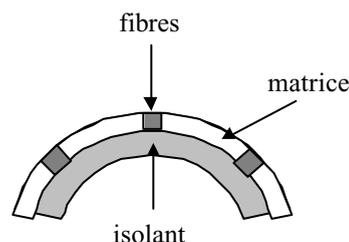


Figure 2.14 : Disposition des matériaux dans l'épaisseur

Le défaut d'une telle structure, outre une fabrication difficile, est qu'elle oblige à avoir des alvéoles de taille réduite et à assurer une bonne liaison entre la fibre et la matrice. En effet, dans le cas contraire, la matrice se trouverait en morceaux désolidarisés, laissant l'isolant seul assurer la tenue mécanique de cette partie. Il y aurait alors de gros risques que les alvéoles soient extrudées à travers les mailles du renfort fibreux sous l'effet de la pression interne.

Il est donc plus intéressant de remplir les alvéoles d'isolant et de laisser une couche continue de matrice qui a une meilleure résistance en dessous (figure 2.15).

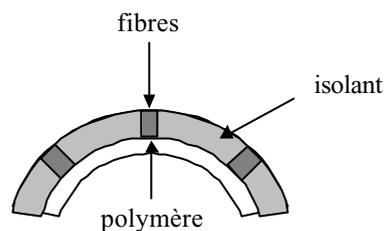


Figure 2.15 : Nouvelle disposition des constituants

L'amélioration du comportement mécanique s'effectue donc au dépens de l'isolation thermique, puisqu'on constate que des ponts thermiques risquent d'exister dans les zones où l'isolant n'est pas présent.

La compatibilité avec le nitrométhane pourra éventuellement être assurée par un liner qui sera donc placé sous la couche de matrice. De plus, le comportement vis-à-vis de la chute de 5 m semble pouvoir être satisfaisant, puisque les parties d'isolant peuvent absorber une partie de l'énergie grâce à leur caractère fortement endommageable.

L'architecture du multimatériaux étant maintenant définie, les constituants doivent être choisis pour pouvoir mettre en pratique les fonctions du réservoir.

### 2.3.5.2 Cahiers des charges et choix des constituants

Les propriétés requises pour le matériau devant constituer le filet de renforcement sont les suivantes :

- en dessous de 70°C, les fibres doivent être suffisamment rigides par rapport aux autres constituants pour supporter dans leur direction longitudinale la plus grande partie du chargement induit par la pression interne maximale de 30 bars,

- en conséquence, elle doivent être suffisamment résistantes pour minimiser la section de ce filet de renforcement et préserver l'architecture alvéolaire,
- les mécanismes de déconfinement choisis imposent une chute importante de leurs propriétés mécaniques à des températures voisines de 150°C.

Toutes ces spécifications poussent donc à s'orienter vers les fibres de polyéthylène dont les propriétés à température ambiante sont importantes, mais qui présentent une température de fusion de 150°C.

En ce qui concerne la couche intérieure, le matériau doit présenter les propriétés suivantes :

- une transition solide / liquide à une température voisine de 150°C,
- une bonne résistance au fluage en dessous de 70°C,
- une rigidité faible pour faciliter la destruction des ondes de choc,
- une ténacité importante jusqu'à -20°C,
- une conductivité thermique aussi faible que possible,
- ne pas réagir avec le nitrométhane pour éviter d'avoir à utiliser un liner métallique.

Une recherche de solutions dans les polymères thermoplastiques oriente le choix vers le polyéthylène haute densité. La compatibilité avec le nitrométhane et l'étanchéité ne pouvant être assurées, un liner en aluminium devra être interposé entre la paroi et le liquide.

Cette structure est le résultat de la conception réalisée à partir de l'analyse du cahier des charges du réservoir. Il faut maintenant définir le procédé de mise en œuvre de cette structure.

### **2.3.6 Procédé de mise en œuvre**

La définition d'un procédé de mise en œuvre d'une structure permettant de tester le multimatériaux doit intervenir dès cette étape puisqu'elle fait partie intégrante de la conception et qu'elle conditionne la viabilité de la solution proposée. Etant donné la complexité de l'architecture, un procédé adapté en plusieurs parties doit être défini.

Le cylindre d'isolant sert de point de départ pour la fabrication du prototype, car de tous les constituants, il est le plus difficile à manipuler ou à transformer. Ce matériau extrêmement poreux constitué de céramiques (45% d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  et 55% de  $\text{SiO}_2$ ) peut être mis en

forme par moulage sous vide. Il est donc disponible directement sous forme de cylindre aux dimensions souhaitées. En revanche, vu la nature et la consistance du matériau, les tolérances des pièces sont de  $\pm 2$  mm. Un usinage sera donc éventuellement nécessaire pour les affiner.

La première phase de cette mise en œuvre consiste à déposer la couche de polyéthylène haute densité (PEHD) sur la face intérieure de l'isolant. Pour mouler du PEHD sur cette paroi, il est nécessaire d'introduire un deuxième cylindre concentrique de diamètre inférieur pour obtenir une épaisseur uniforme. Des essais préliminaires montrent qu'après refroidissement du polyéthylène, il devient impossible de retirer un noyau métallique. Ce noyau doit donc pouvoir être détruit facilement. Pour cette raison, un noyau en sable sera utilisé pour cette phase de la fabrication du réservoir, et sera ensuite détruit.

La fragilité et la friabilité de l'isolant interdisent l'utilisation de pressions importantes de l'ordre de 200 bars, généralement employées dans les procédés d'injection de PEHD. De plus, des essais préliminaires montrent que l'application d'une pression est tout de même nécessaire, puisque même sous l'effet de la gravité, le PEHD s'écoule très mal (son indice de fluidité est au maximum de 28 g/10min à 190°C). La manière d'injecter le polymère fondu la plus simple et la moins risquée vis à vis de l'endommagement de l'isolant est de l'aspirer dans le moule constitué par l'isolant et le noyau. Les tests effectués montrent que non seulement, cette dépression suffit à mettre le PEHD en mouvement, mais qu'elle permet aussi un bon accrochage entre ce dernier et l'isolant. Ce procédé à basse pression est donc retenu pour la mise en œuvre du réservoir.

Une fois obtenu ce cylindre constitué de l'empilement de deux couches, il faut se pencher sur la mise en place du renfort. Celui-ci étant incrusté dans l'isolant, une opération de bobinage classique ne suffira pas à faire pénétrer les fibres. Il faut donc creuser des sillons afin de préparer la trajectoire du renforcement. Une opération d'usinage doit donc permettre d'usiner des hélices avec la largeur et le pas souhaité.

Ensuite, les fibres doivent être bobinées dans ces rainures, en ajoutant aux extrémités du cylindre des fonds adaptés permettant de changer de direction et de passer d'une hélice à la suivante. Ces outillages seront définis au moment de concevoir le montage de mise en œuvre proprement dit.

## 2.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'illustrer par un exemple le déroulement de la conception d'un multimatériaux. Celui ci a mis en évidence l'utilité de ce type de matériaux pour résoudre des problèmes de conception concernant des pièces dont les fonctions sont multiples.

L'étude a débuté de manière classique, puisqu'à partir du cahier des charges client, une analyse fonctionnelle a conduit à la rédaction d'un cahier des charges du matériau. La recherche de solution dans le domaine des matériaux monolithiques n'ayant pas donné satisfaction, il a fallu rechercher des mécanismes qui permettaient de réaliser ces fonctions. Le cahier des charges établi pour le matériau est devenu en quelque sorte le cahier des charges fonctionnel du multimatériaux. Un multimatériaux constitué d'un empilement de polyéthylène haute densité et de préforme céramique, renforcé par un filet de fibres de polyéthylène a été conçu, et les phases nécessaires à la mise en œuvre d'une structure d'essai ont été proposées. Ce dernier point semble particulièrement important puisque la définition du procédé de mise en œuvre est indissociable du choix de l'architecture et de la sélection des constituants. Il était donc indispensable de l'intégrer dans la conception le plus tôt possible.

Au cours de ce travail, certains principes, énoncés au premier chapitre sont apparus capitaux, tels que l'importance attachée à l'analyse fonctionnelle de la pièce, la séparation si elle est possible du problème global en plusieurs sous problèmes, ou la nécessité de procéder à une évaluation des concepts proposés avant de pousser leur développement ou de faire un choix.

Bien qu'il ait été conçu pour répondre au cahier des charges, les performances de ce multimatériaux ne sont pas encore validées et encore moins quantifiées. Pour cette raison, il est nécessaire de procéder à une simulation de son comportement, et de faire ressortir les paramètres prépondérants.

Les propriétés des matériaux utilisés étant elles aussi assez mal cernées, une campagne de caractérisation a du être lancée avec pour but de déterminer les propriétés des constituants en tenant compte de l'influence du procédé de mise en œuvre qui a été défini pour le multimatériaux.

## Références bibliographiques

**Beland S., Lee S., Scott. R.F.**, A review of high-performance thermoplastic resins and their composites, Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol.36, n°4, pp. 202-212 (1990).

**Belmas R.** Du choc à la détonation : l'approche de la DAM, études sur le phénomène de transition choc-détonation (1992)

**Bibo G.A., Hogg P.J.**, Review : the role of reinforcement architecture on impact damage mechanisms and post-impact compression behaviour, Journal of Materials Science, Vol. 31, n°5, pp. 1115-1137 (1996).

**Carlsson L.A.**, Thermoplastic composite materials, Ed. Elsevier (1990).

**Cebon D., Ashby M.F., Lee-Shotaman L.**, Cambridge Engineering Selector v3.2 User's Manual Release 1, Granta Design Ltd (2001)

**Chretien G.** Matériaux composites à matrice organique, Technique et Documentation (1986).

**Devaux E., Cazé C.**, Composites of UHMW polyethylene fibres in a LD polyethylene matrix. I – Processing conditions, Composites Science and Technology, Vol. 59, pp. 459-466 (1999a).

**Devaux E., Cazé C.**, Composites of UHMW polyethylene fibres in a LD polyethylene matrix. II – Fibre / matrix adhesion, Composites Science and Technology, Vol. 59, pp. 879-882 (1999b).

**Iyer S.R., Ball M., Drzal L.T.** Production of composite materials by powder prepregging, Proceedings of ICCM/8, Vol. 1, pp. 10/A/1-10/A/10 (1991).

**Jaubert J-N., Schuffenecker L.** Pressions de vapeur saturantes des composés organiques, Techniques de l'ingénieur, Vol. K 3, pp. K670 1-8.

**Lacroix F.V., Werwer M., Schulte K.**, A new technique for the preparation of polyethylene fibre / polyethylene matrix composites and the resulting mechanical properties, Proceedings of ICCM-11, Vol. IV, pp. 279-287 (1997).

**Lacroix F.V., Lu H.Q., Schulte K.**, Wet powder impregnation for polyethylene composites : preparation and mechanical properties, Composites Part A, Vol. 30, pp. 369-373 (1999).

**Legeay G., Benoist P., Poncin-Epaillard F.**, Les traitements de surface des polymères – Adhésion, Double Liaiso, - Chimie des Peintures, No. 447-448, pp. 17-25 (1993)

**Mercier J.P., Marechal E.**, Traité des Matériaux : chimie des polymères. Synthèses, réactions, dégradation, Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (1993).

**Nardin M., Ward I.M.**, Influence of surface treatment on adhesion of polyethylene fibres, Materials Science and Technology, Vol. 3, pp. 814-826 (1987).

Notices techniques KAPYROK (1996)

Notices techniques DSM High Performance Fibers B.V., Dyneema : propriétés et applications, Ed. 06/1994

Notices techniques Du Pont de Nemours International S.A., Static Data for KEVLAR® 49 Fibers (05/1986)

**Marais C., Feillard P.**, Manufacturing and mechanical characterization of unidirectional polyethylene-fibre/polyethylene-matrix composites, Composites Science and Technology, Vol. 45, pp. 247-255 (1992).

**Reyne M.** Les plastiques : Polymères, transformations et applications, Ed. *Hermes* (1992)

**Roychowdhury S., Advani S.G.**, An Experimental Investigation of Consolidation in Thermoplastic Filament Winding, Composites Manufacturing, Vol.2, n°2, pp. 97-104 (1991).

**Shalom S., Harel H., Marom G.,** Fatigue behaviour of flat filament-wound polyethylene composites, Composites Science and Technology, Vol. 57, pp. 1423-1427 (1997).

**Thouvenin.J.,** Les Mécanismes Élémentaires de la Détonique, Fascicule 1, 2<sup>ème</sup> édition, pp. 2-47

**Tsai. S.,** An Overview of Technical and Commercial Activities, Status of Composites Design Center (1996)

**Trotignon J-P., Verdu J., Dobracginsky A., Piperaud M.,** Matières Plastiques : Structures-Propriétés, Mise en Œuvre, Normalisation, Ed. Nathan (1996).

# Chapitre 3 : Caractérisation thermomécanique des constituants

Dans le cadre du dimensionnement du réservoir, il a été impératif de connaître les propriétés de la fibre de polyéthylène. En effet, le comportement de la structure est déterminé par celui des constituants de base du matériau. La connaissance de ces caractéristiques est d'autant plus nécessaire que le choix de cette fibre a été justifié non seulement par ses résistance et rigidité à température ambiante pour résister à la pression interne, mais aussi par l'évolution de ces propriétés en fonction de la température.

Des essais de traction ont été effectués à température ambiante, en nombre suffisant pour que les résultats soient assez représentatifs du comportement des constituants. Etant donné la nature de la fibre, obtenue à partir d'un polymère dont le comportement est généralement viscoélastique, il était attendu que la vitesse de sollicitation ait une influence importante sur le module et la résistance en traction. Il était donc nécessaire d'effectuer des essais à différentes vitesses de déformation sur les fibres comme sur le PEHD.

Ensuite, le mécanisme de déconfinement choisi imposait de connaître précisément la manière dont chutent les propriétés mécaniques à des températures plus élevées. Cela a conduit à mener des essais en température. De plus, le comportement en fluage des constituants a du être examiné, puisqu'à nouveau, la vitesse du déconfinement dépend fortement de leur capacité à se déformer sous une charge constante.

Il a aussi été nécessaire de caractériser le liner métallique pour vérifier qu'il ne supportait pas à lui tout seul des pressions trop importantes, ce qui serait susceptible de retarder le déconfinement voire de l'empêcher.

Enfin, quelques caractérisations suivant des essais très spécifiques ont du être menées sur l'isolant de manière à évaluer sa capacité à supporter les opérations de mise en œuvre du multimatériaux.

## **3.1 Fibres de polyéthylène**

Une recherche bibliographique permet de trouver des résultats concernant les propriétés mécaniques des fibres de polyéthylène [Dessain, 1992; Devaux, 1999], mais ceux

ci restent trop imprécis pour la plage de température de notre application, et s'écartent quelque peu des valeurs fournies par le fabricant. Un grand soin doit être apporté à la définition de la procédure et des conditions de ces essais puisqu'elles semblent avoir une importance cruciale pour notre application, en particulier pour le déconfinement.

### 3.1.1 Mesure du diamètre des fibres

Pour pouvoir déduire les propriétés mécaniques des fibres à partir des essais effectués, il a été nécessaire de mesurer le diamètre des fibres. Cette opération est relativement difficile sur les fibres de polyéthylène étant donné leur mauvaise cylindricité et la grande dispersion des dimensions. De plus, l'ordre de grandeur de leur diamètre (environ 20  $\mu\text{m}$ ) a rendu douteuse toute mesure des diamètres par interférométrie laser (précision de l'ordre du micron). La mesure du diamètre des fibres a donc été effectuée par analyse d'image grâce à une observation microscopique.

On a constaté sur ces photographies que non seulement les fibres ne sont pas parfaitement circulaires, mais qu'en plus certaines d'entre elles sont collées. Toutefois, une première mesure a pu être effectuée à partir de cette mèche en utilisant un plus fort grossissement (figure 3.1).



Figure 3.1 : Mesure du rayon des fibres

La mesure a été effectuée ainsi sur cinquante fibres provenant d'une bobine de fibres Dyneema SK 75. Le diamètre moyen qui en ressort est de 20,5  $\mu\text{m}$ , avec un écart type de 1,3.

Le nombre de filaments dans la mèche a été calculé à partir de pesées sur les longueurs de mèches variant entre 25 mm et 5 m, en utilisant le diamètre trouvé précédemment. Il en est ressorti une section de  $0,186 \pm 0,005 \text{ mm}^2$  et un nombre de  $550 \pm 65$  filaments dans la mèche.

### **3.1.2 Essais de traction à température ambiante**

L'objectif de cette campagne d'essais était d'obtenir les caractéristiques des fibres de polyéthylène et d'étudier précisément leur comportement. En effet, les valeurs du module d'Young, des résistances à rupture en traction et des déformations à rupture relevées dans la littérature étaient seulement données pour des essais effectués avec des vitesses de déformation de  $0,06 \text{ min}^{-1}$ . Dans le cadre de cette étude, des essais à des vitesses de déformation comparables ont été menés pour confirmer ces valeurs. Le caractère viscoélastique de la fibre a ensuite été étudié au travers d'essais de traction à vitesse de déformation très faible puis très élevée. Ainsi, en s'apparentant à celui du polyéthylène à partir duquel elles sont fabriquées [Smith, 1980] [Pennings, 1983] [Barham, 1985] [Hoogsteen, 1988], le comportement des fibres risquait de varier considérablement en fonction de la vitesse de sollicitation.

#### **3.1.2.1 Dispositif expérimental**

Les essais de traction sur monofilaments ont été effectués sur une machine de traction ADAMEL DY 32 équipée de mors pneumatiques, d'une chaîne d'acquisition et pilotée par un micro-ordinateur. Le capteur de force de la machine a une capacité de 5 kN. Or des calculs préliminaires ont permis d'évaluer l'effort maximal de traction sur la fibre de polyéthylène à 1 N. Il a donc été nécessaire d'adapter le montage pour utiliser un capteur d'effort LVDT de capacité maximale 10 N. Compte tenu du très faible diamètre de la fibre, l'utilisation d'un extensomètre à contact pour mesurer l'allongement de l'échantillon n'a pas été envisagé. Il a néanmoins été possible d'utiliser un capteur capacitif pour relever le déplacement du mors mobile. Cependant, la grande déformabilité des fibres et la longueur des éprouvettes testées (20 à 360 mm) indiquaient des allongements supérieurs à 5 mm, ce qui dépassait l'étendue de

mesure du capteur capacitif disponible. L'allongement de l'éprouvette et la déformation correspondante ont donc été déduits de la mesure de déplacement de la traverse supérieure.

La difficulté principale résidait dans la manipulation des fibres et leur prise dans les mors. Après plusieurs essais, une procédure de préparation des échantillons a été mise au point. La fibre est collée à ses deux extrémités sur un cadre de papier (figure 3.2) que l'on coupe une fois l'échantillon positionné dans les mors.

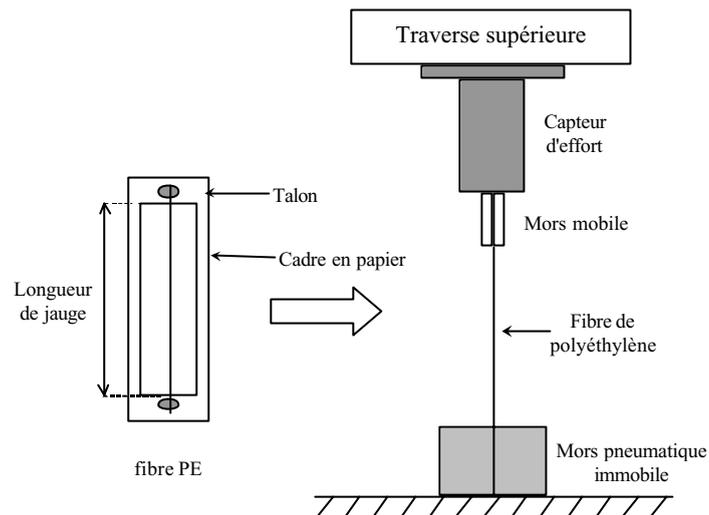


Figure 3.2 : Procédure de préparation des échantillons

De plus, pour éviter un glissement, chaque fibre a été enroulée avant d'être fixée sur un talon à l'aide d'une colle époxy. Ce procédé permet de serrer convenablement la fibre dans les mors grâce aux talons et de bien l'aligner avec l'axe de traction.

### 3.1.2.2 Correction de complaisance

L'allongement mesuré par la machine au niveau de la traverse mobile n'étant pas le résultat de la seule déformation de l'éprouvette mais du montage entier. Il convenait d'effectuer une correction consistant à enlever la partie du déplacement relative au montage seul.

La procédure utilisée repose sur la réalisation d'essais de traction sur des éprouvettes de longueurs différentes. Pour chaque essai, on détermine la pente de la courbe force - déplacement de la traverse. La valeur de cette pente combine la contribution du montage seul (qui doit être constante quelle que soit la longueur de l'échantillon), et celle du monofilament

qui décroît linéairement quand la longueur de l'éprouvette augmente. Ainsi, en effectuant des essais sur des longueurs variables, on peut tracer l'évolution de la complaisance totale mesurée en fonction de la longueur de jauge. Cette complaisance déduite de la pente calculée précédemment évolue également linéairement en fonction de la longueur de l'éprouvette (figure 3.3)

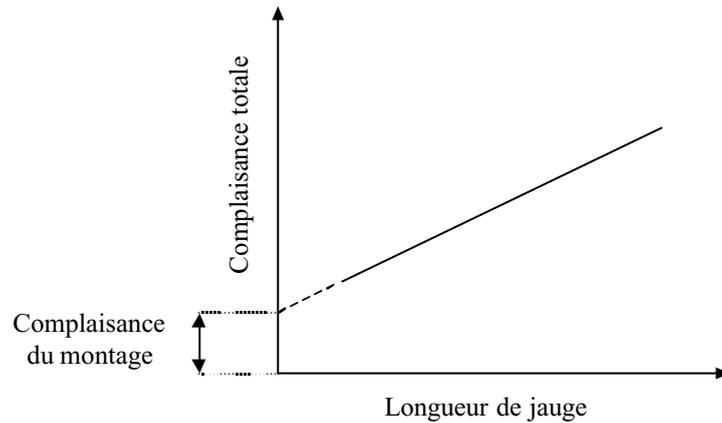


Figure 3.3 : Détermination de la complaisance du montage

L'ordonnée à l'origine de cette droite représentant l'évolution de la complaisance totale en fonction de la longueur de jauge est ensuite identifiée comme la complaisance du montage.

Pour établir cette correction, 25 essais de traction ont été réalisés pour des longueurs de jauge de 40 mm, 80 mm, 120 mm, 160 mm et 200 mm. La figure 3.4 illustre la détermination de la complaisance du montage pour des essais à une vitesse de déformation de 4%/min.

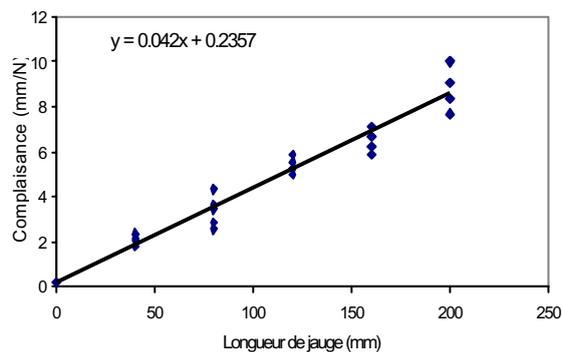


Figure 3.4 : Exemple de calcul de la complaisance du montage

Le calcul de l'allongement  $\Delta \ell_e$  de l'échantillon pendant l'essai est alors calculé à partir de la relation suivante :

$$\Delta \ell_e = \Delta \ell_{total} - F \times C_m \text{ où } \Delta \ell_{total} \text{ est le déplacement de la traverse,}$$

F est la force mesurée,

$C_m$  est la complaisance du montage.

Par cette méthode, on arrive donc à calculer l'allongement réel de l'éprouvette, ce qui permet, à l'aide du relevé de la force, de tracer la courbe contrainte – déformation du filament.

### 3.1.2.3 Résultats des essais

Des essais de traction ont été menés sur des échantillons d'une longueur de 40 à 200 mm avec quatre vitesses de déformation différentes : 0,1 %/min, 1 %/min, 4 %/min, 100 %/min; chaque valeur des paramètres ayant donné lieu à 5 essais. Les courbes obtenues étant en général non linéaires, le module d'Young a été déterminé à partir de la pente à l'origine de la courbe contrainte déformation (figure 3.5).

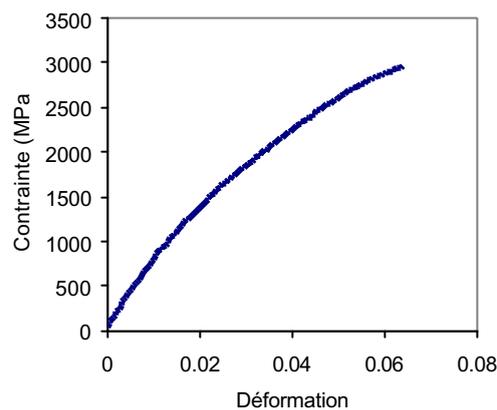
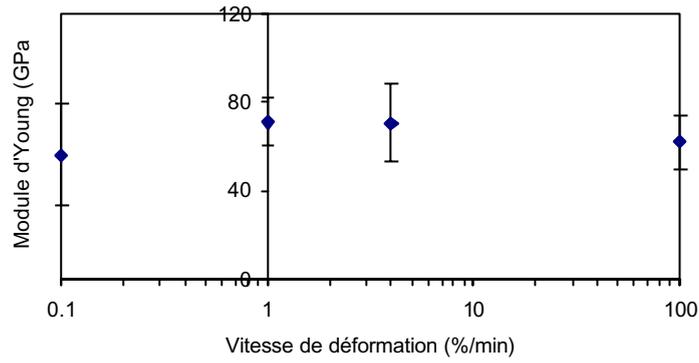
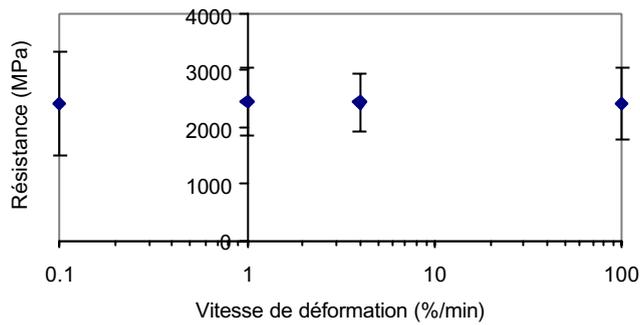


Figure 3.5 : Exemple de courbe de traction sur fibre PE

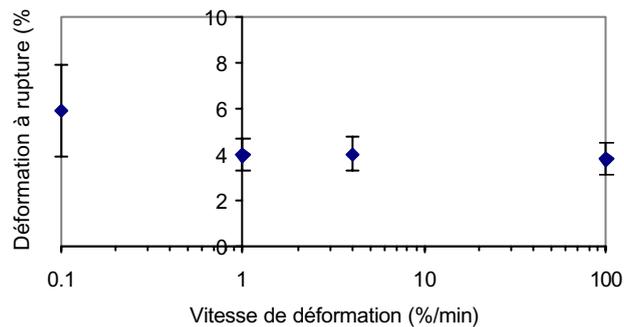
Les résultats de ces essais sont présentés dans la figure 3.6 sous forme de graphiques exprimant la propriété mécanique considérée en fonction de la vitesse de déformation reportée sur une échelle logarithmique.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.6 : Influence de la vitesse de déformation sur

(a) la rigidité

(b) la résistance

(c) la déformation à rupture

Ces résultats confirment que l'orientation des chaînes moléculaires de polyéthylène dans la direction de la fibre donne à la microstructure un fort taux de cristallinité. La conséquence de ce constat est que non seulement la fibre présente de grandes rigidité et résistance, mais aussi que le caractère viscoélastique du comportement a été énormément réduit comparé au PEHD. Il en résulte une très faible variation de ces propriétés en comparaison avec la plage de vitesses de déformation étudiée.

En plus de ces courbes, les résultats doivent être comparés avec les valeurs données par le fabricant ou trouvées dans la littérature. L'ensemble des résultats est reporté dans le tableau 3.1. Chaque valeur est la moyenne sur 5 essais et l'incertitude donnée correspond à l'écart type.

	Module d'Young (GPa)	Résistance en traction (GPa)	Déformation à rupture (%)
1%/min	71 ± 12	2,4 ± 0,6	3,95 ± 0,7
4%/min	71 ± 18	2,4 ± 0,5	4 ± 0,75
100%/min	62 ± 12	2,4 ± 0,6	3,76 ± 0,7
0,1%/min	56 ± 23	2,4 ± 0,9	5,88 ± 2
Données fabricant	89	2,7	3,5
[Dessain, 1992].	68	2,25	4,89

Tableau 3.1 : Comparaison des propriétés suivant les sources

Une des raisons pouvant expliquer les écarts constatés réside dans la mesure du diamètre des fibres, qui introduit une incertitude importante dans le résultat. En effet, en effectuant un rapide calcul d'incertitude, sans tenir compte de l'erreur commise sur la mesure de la pente  $k$ , on peut écrire :

$$k = \frac{ES}{\ell} \quad \text{où } k \text{ est la pente de la courbe force – déplacement,}$$

$S$  est la section de la fibre,

$\ell$  la longueur de l'éprouvette.

On a alors  $\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \ell}{\ell} + 2 \frac{\Delta D}{D}$  où  $D$  est le diamètre de la fibre. En prenant par exemple  $\ell = 40$

mm,  $\Delta \ell = 1$  mm, on obtiendrait  $\Delta E = 10,8$  GPa.

Cela montre bien que les irrégularités dans le diamètre de la fibre sont un facteur limitant pour effectuer une caractérisation mécanique précise.

Compte tenu de ces incertitudes relatives à la mesure du diamètre et à la procédure d'essai, une étude statistique des résultats a été menée afin d'évaluer leur cohérence. De plus, des essais sur mèches de fibre ont permis d'obtenir des résultats avec des conditions d'essai différentes.

### 3.1.2.4 Approche statistique de la résistance des fibres

Bien que le comportement en traction des filaments ne soit pas typiquement élastique fragile, il se distingue tout de même par une zone linéaire non négligeable. Pour cette raison, on a supposé que la résistance était gouvernée par la présence de défauts, comme par exemple des réductions de diamètre le long de la fibre.

Ainsi, en appliquant la théorie de Weibull [Andersons, 2002] à la série d'essais effectués avec une vitesse de déformation de 4%/min, on peut caractériser la distribution des résistances des fibres en traçant pour chaque longueur de jauge la probabilité de survie en fonction de la résistance (figure 3.7).

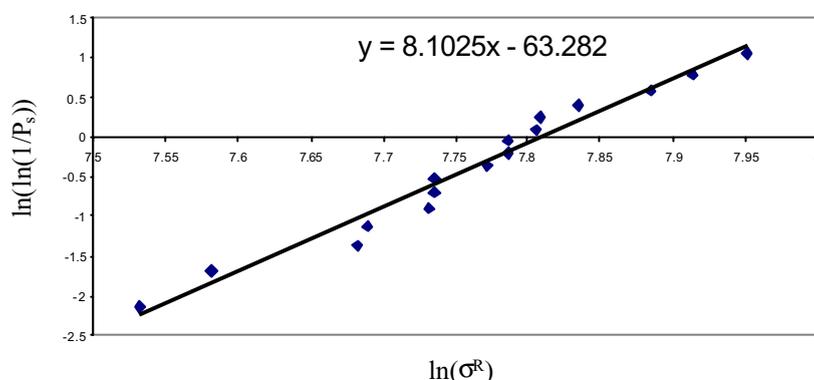


Figure 3.7 : Diagramme de Weibull pour une longueur de jauge de 80 mm

Cette analyse a permis de trouver pour chaque longueur de jauge un module de Weibull, représentant la dispersion des valeurs, et une contrainte correspondant à une probabilité de rupture de 0,5. Bien que ce travail eût nécessité un plus grand nombre d'essais (une vingtaine par longueur de jauge), l'ensemble des résultats pour la série à 4%/min est présenté dans le tableau 3.2.

Longueur de jauge (mm)	Module de Weibull	$\sigma_{0,5}$ (MPa)
40	4,77	2377
80	8,10	2356
120	15,97	2271
200	8,95	2486

Tableau 3.2 : Modules de Weibull et contraintes correspondant à une probabilité de rupture de 0,5

L'augmentation significative du module de Weibull avec la longueur de jauge peut être relié à la présence d'un type de défauts pour des longueurs de jauge supérieures à 80 mm. Toutefois, la très faible décroissance de la contrainte, mais surtout sa forte augmentation pour la longueur de jauge la plus importante tend à invalider ces derniers essais. En effet, il semble que le fait d'extraire ces filaments de la mèche ait impliqué une sélection involontaire, éliminant de ce fait les filaments les moins résistants de la mèche, conduisant ainsi à une augmentation du module de Weibull et empêchant la chute de la résistance.

Il est donc apparu que les essais avec les longueurs de jauge de 120 et 200 mm ne devaient plus être pris en compte, et que ceux concernant les longueurs de 40 et 80 mm n'étaient pas forcément représentatifs des variations de diamètre des fibres. Devant ces problèmes causés par les essais sur filaments, des essais sur les mèches de fibres ont été effectués, permettant d'étudier les comportements de la mèche entière, mais aussi de déduire les propriétés des filaments.

#### **3.1.2.4 Traction sur mèche de fibres à température ambiante**

Généralement utilisé pour réduire le nombre d'essais à réaliser [R'Mili, 1997], les essais sur mèches peuvent être employés pour essayer de confirmer les résultats obtenus par les essais sur filaments seuls. Néanmoins, cette opération nécessite de connaître ou de choisir une loi de distribution des résistances telle que celle de Weibull qui est la plus souvent employée [Chi, 1984][R'Mili, 1994][R'Mili, 1995][R'Mili, 1996].

Les essais ont été effectués sur cinq longueurs de jauges différentes pour pouvoir effectuer la correction de complaisance, en mesurant la force exercée sur la mèche non plus à l'aide du capteur LVDT de capacité 10 N mais à l'aide du capteur de force de la machine (capacité 5 kN). Une courbe contrainte – déformation obtenue suite à un essai sur mèche est représentée à la figure 3.8.

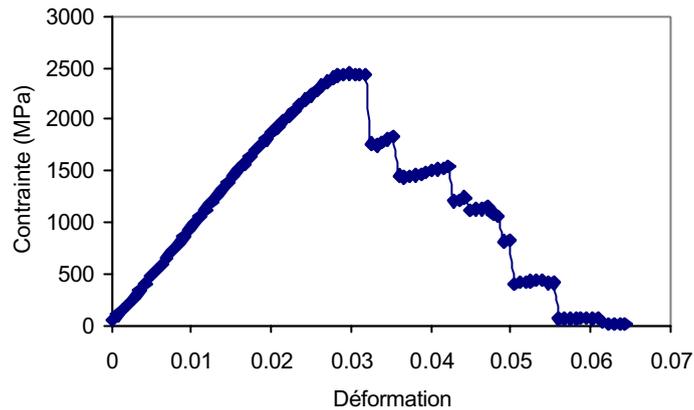


Figure 3.8 : Exemple de courbe de traction sur mèche

Les résultats illustrés à la figure 3.9 montrent que les résistances obtenues par les essais sur filaments (représentées ici avec leurs valeurs extrêmes) sont assez proches de celles obtenues par les essais sur mèches. Cette corrélation indique donc une faible dispersion des résistances des filaments correspondant à un module de Weibull élevé. Les essais sur mèches permettent donc de trouver directement la résistance des filaments pour des longueurs de jauges supérieures à 120 mm.

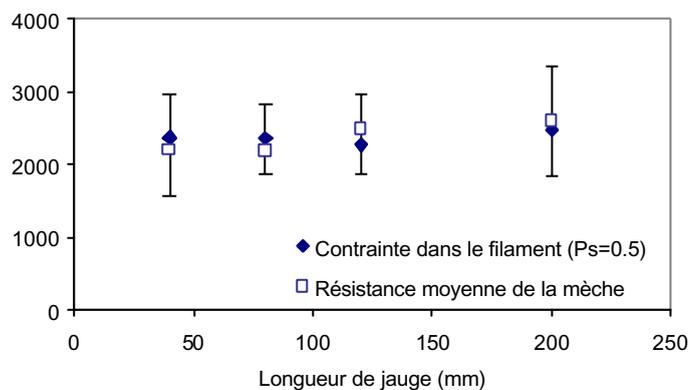


Figure 3.9 : Comparaison des résultats des essais sur filaments et sur mèches

Le module d'Young, calculé à partir de la pente à l'origine, puis une résistance moyenne de la mèche ont été déterminés. L'ensemble des résultats, reporté dans le tableau 3.2, avec pour comparaison les résultats des essais sur filaments, ont mis en évidence des écarts sur la rigidité qui ne s'expliquent pas seulement par les incertitudes sur la mesure du diamètre (qui auraient aussi entaché les valeurs des résistances).

	Module d'Young (GPa)	Résistance (GPa)
Filaments	71	2,4
Mèche de fibres	104	2,4

Tableau 3.3 : Comparaison des essais sur fibre seule et sur mèche

Pour trouver une explication à ces résultats, l'effet des liaisons inter fibres à l'intérieur de la mèche a été étudié à partir d'un modèle représentant deux cas opposés de couplage de filaments dans la mèche.

On modélise une fibre par une succession de ressorts en série (figure 3.10). Ensuite, on compare la raideur équivalente aux deux systèmes suivants, représentant deux fibres juxtaposées et totalement indépendantes pour l'un, et liées pour l'autre.

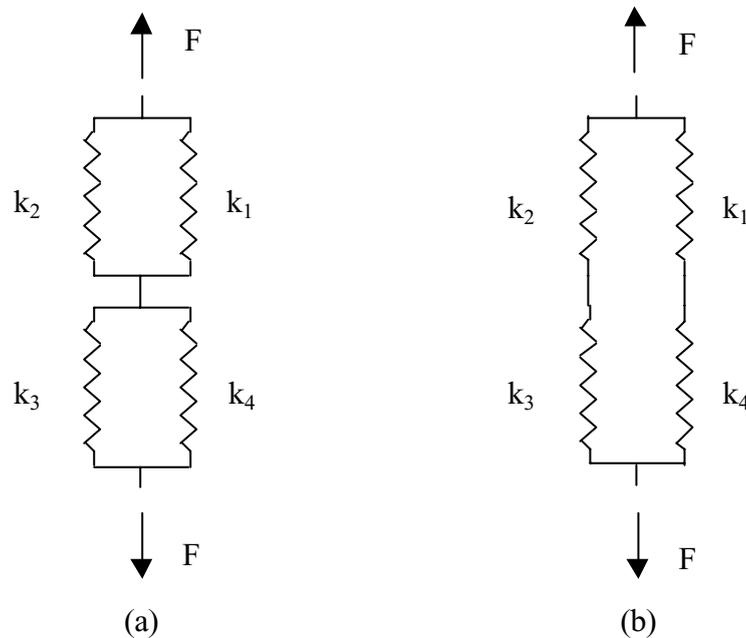


Figure 3.10 : Modélisation des fibres

(a) liées (raideur  $k_{\#}$ )

(b) indépendantes (raideur  $k_{//}$ )

Sur ce modèle, on peut calculer les raideurs équivalentes  $k_{\#}$  et  $k_{//}$ , puis étudier le signe de  $k_{\#} - k_{//}$  en fonction des valeurs des  $k_i$ . Le calcul des raideurs équivalentes donne :

$$k_{\#} = \frac{(k_1 + k_2)(k_3 + k_4)}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4} \text{ et } k_{//} = \frac{k_1 k_4 (k_2 + k_3) + k_2 k_3 (k_1 + k_4)}{(k_1 + k_4)(k_2 + k_3)}$$

L'étude du signe de  $k_{\#} - k_{//}$  montre que cette quantité est positive si et seulement si  $(k_1 k_3 - k_2 k_4)^2$  est positif, ce qui est vérifié quelles que soient les valeurs prises par les  $k_i$ . La raideur équivalente des fibres liées est donc toujours supérieure à celle des deux fibres juxtaposées et indépendantes. Ainsi, ces interactions permettaient aussi d'expliquer les différences de résultats trouvés entre les essais sur monofilaments et sur mèches.

De plus, le mode de rupture des mèches semble gouverné par ces mêmes liaisons. En effet, lorsqu'un des filaments approche de la rupture, elles permettent de redistribuer les efforts sur les filaments voisins, ce qui a pour effet de provoquer des ruptures par paquets.

Le comportement de la mèche de fibres diffère donc quelque peu de celui du filament seul en grande partie à cause des liaisons inter fibres et de la friction induite par la torsion de la mèche, qui ont pour effet d'augmenter la rigidité apparente des fibres.

### **3.1.3 Essais de traction à température élevée**

#### **3.1.3.1 Dispositif expérimental**

Pour choisir le moyen de chauffage, plusieurs solutions se sont présentées, mais il paraissait évident que pour des essais sur fibre, un four tubulaire était plus adapté qu'une enceinte chauffante dont le volume était beaucoup plus important.

Le four utilisé est fendu sur toute sa longueur pour permettre l'installation de la fibre dans les mors avant la mise en place du four. Une paroi de cuivre est intercalée entre la résistance chauffante et la fibre pour éviter un contact entre elles et uniformiser la température. L'ensemble est placé dans un tube d'acier, servant de support à l'isolant thermique placé à l'extérieur (figure 3.11).

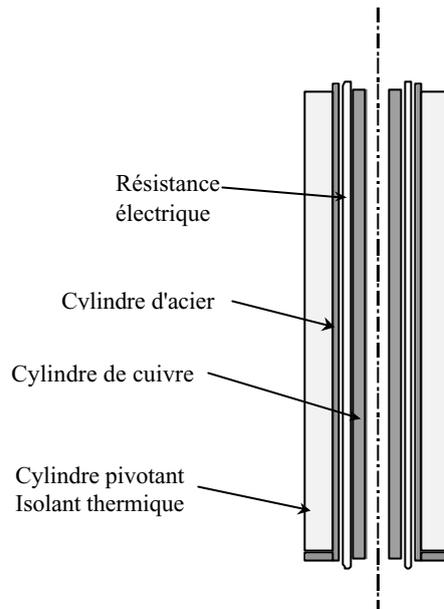


Figure 3.11 : Four tubulaire

Des bouchons placés aux extrémités du four permettent de limiter les fuites de chaleur et donc de minimiser le gradient de température dans le four. Pour mesurer ce dernier, on utilise un thermocouple que l'on déplace le long du four. On vérifie de cette manière que la variation de température reste inférieure à  $10^{\circ}\text{C}$ , ce qui reste acceptable étant donné la longueur importante (330 mm) de la zone chauffée.

Une fois cette vérification effectuée, le four a été étalonné pour avoir directement la température (mesurée au milieu de la longueur) en fonction de la tension appliquée à la résistance.

La procédure générale de préparation des échantillons et l'instrumentation utilisée pour les essais à température ambiante ont été conservées. Seule la longueur de jauge des éprouvettes reste donc à fixer. Étant donné que la fibre ne pouvait être chauffée sur toute sa longueur (les mors d'attache sont à l'extérieur du four), il fallait minimiser la taille de ces extrémités non chauffées par rapport à la taille du four. Pour cette raison, une longueur de jauge de 360 mm a été retenue.

### 3.1.3.2 Essais de traction sur monofilament à température élevée

Les températures choisies pour cette série sont  $70^{\circ}\text{C}$  (borne supérieure de la plage d'utilisation normale du réservoir),  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $125^{\circ}\text{C}$ ,  $140^{\circ}\text{C}$  pour étudier le déconfinement et vérifier que le mécanisme choisi est fiable. La température de  $150^{\circ}\text{C}$  choisie initialement n'a

pas été incluse dans l'étude car elle était trop proche de la température de fusion de la fibre. Pour chaque essai, on a trouvé une résistance, un allongement maximum et un module d'Young (figure 3.12).

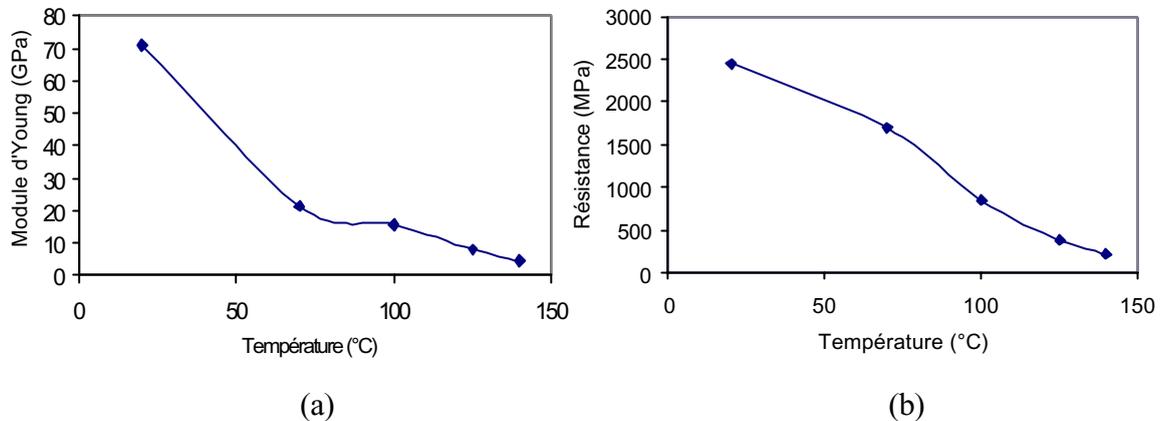


Figure 3.12 : Evolution en fonction de la température

(a) du module d'Young

(b) de la résistance

Les résultats obtenus montrent bien la chute de propriétés de la fibre, mais celle-ci n'est pas aussi brutale que le mécanisme de déconfinement l'exigerait. En effet, on constate que les propriétés, en particulier le module d'Young, ont fortement diminué dès 70°C, alors que le réservoir doit encore avoir à cette température la même tenue mécanique qu'à l'ambiante.

Toutefois, ces valeurs doivent être corrigées, car la différence de température entre les parties de la fibre situées à l'intérieur et à l'extérieur du four n'a pas été prise en compte. Or ici, les allongements considérés sont de plus en plus grands lorsque la température augmente (figure 3.13), et ne sont pas négligeables puisque de l'ordre de 10 à 30% pour les essais les plus longs. La partie de fibre extérieure au four a donc une longueur importante par rapport aux dimensions de l'éprouvette.

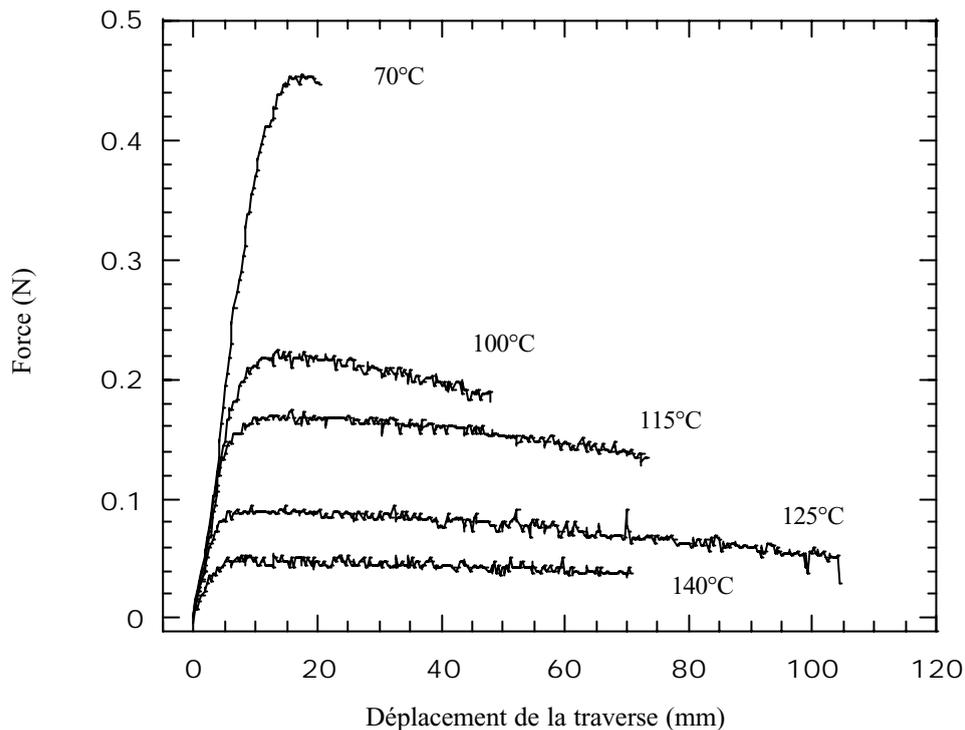


Figure 3.13 : Evolution du comportement de la fibre en fonction de la température

De plus, la valeur des allongements à rupture augmente avec la température jusqu'à 125°C, mais décroît ensuite à 140°C. Cette tendance doit toutefois être considérée avec beaucoup de précautions vu la mauvaise reproductibilité des essais à 140°C du point de vue de l'écoulement.

### 3.1.4 Essais de fluage

La simulation numérique du déconfinement nécessite de connaître non seulement les propriétés mécaniques à différentes températures, mais aussi le comportement en fluage à des températures élevées pour ces fibres. Une campagne d'essais a donc été nécessaire pour recueillir ces données.

#### 3.1.4.1 Dispositif expérimental

Un essai de fluage consiste à appliquer une contrainte constante à un matériau, et à mesurer sa déformation au cours du temps. Pour ces essais, le montage le plus simple consiste à appliquer non pas une contrainte constante mais une charge constante, et à mesurer non pas

sa déformation mais son allongement. Cependant, étant donné la difficulté de manipuler ces fibres, un levier a été conçu pour appliquer la charge sur la fibre (figure 3.14). Pour pouvoir supporter ce levier, la fibre testée doit maintenant former une boucle et non plus être rectiligne comme auparavant.

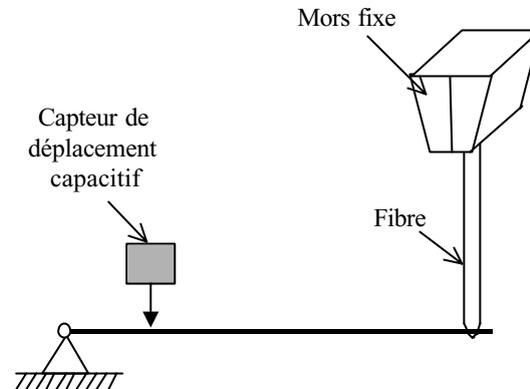


Figure 3.14 : Montage d'essai de fluage sur fibres

L'avantage de ce système est de permettre la mesure des déplacements en un point du levier plus proche de l'axe du pivot. Ainsi, étant donné la capacité de la fibre à s'allonger à haute température, la course maximale du capteur (5 mm) est atteinte beaucoup plus tard.

Ces essais devant être réalisés aux mêmes températures que les essais de traction, le même four a été utilisé, chauffant donc les fibres sur une longueur de 330 mm.

### 3.1.4.2 Essais de fluage sur filaments de polyéthylène

Ces essais ont pour but d'identifier une loi de fluage des fibres de polyéthylène en vue de la simulation numérique du déconfinement. Etant donné qu'il existe plusieurs types de lois de fluage, il faut commencer par choisir la forme de celle qui sera recherchée de manière à connaître le nombre et la nature des paramètres à identifier.

Des études plus anciennes [Leblans, 1989] [Govaert, 1995] ont montré qu'une loi puissance convenait bien à la description de la variation du module de relaxation de contrainte en fonction du temps, et qu'une exponentielle décroissante pouvait représenter l'influence de la température sur la déformation obtenue. La loi est donc de la forme :

$$\varepsilon^c = C_0 \sigma^{C_1} t^{C_2} e^{(-C_T / T)} \text{ où } \varepsilon^c \text{ est la déformation de fluage,}$$

$\sigma$  est la contrainte appliquée,

$C_i$  les constantes du modèle.

Pour identifier les paramètres relatifs à cette loi de fluage, des essais ont été réalisés avec 5 températures et deux niveaux de charge différents. Notons que comme l'illustre la figure 3.15, les essais ont montré que la vitesse de déformation reste constante, donc  $C_2$  est fixée égale à 1.

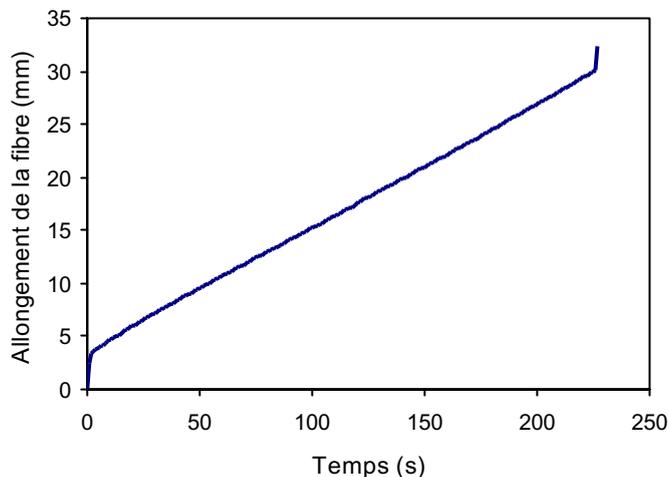


Figure 3.15 : Courbe de fluage sur fibre de polyéthylène ( $T = 140^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 400 \text{ MPa}$ )

Les constantes restantes  $C_0$ ,  $C_1$  et  $C_T$  sont déterminées en traçant la variation de vitesse de déformation en fonction de l'inverse de la température pour les deux niveaux de charge choisis. Les courbes obtenues sont présentées à la figure 3.16.

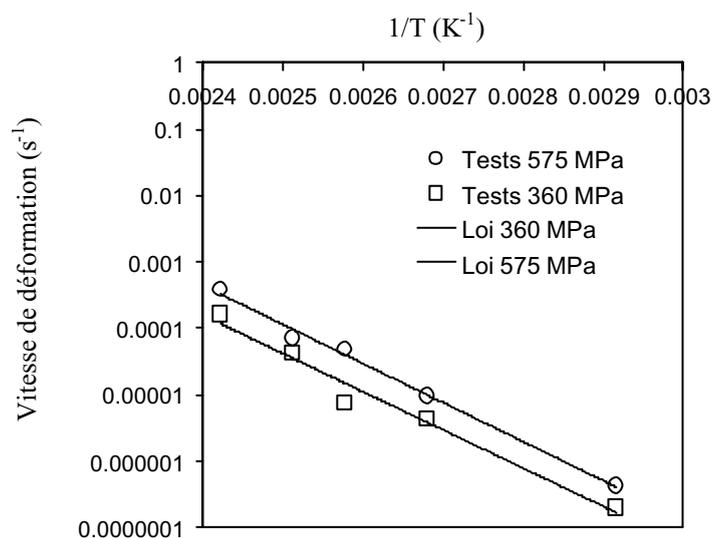


Figure 3.16 : Variation de la vitesse de fluage en fonction de l'inverse de la température

L'identification des paramètres nous donne la loi de Bailey-Norton suivante :

$$\varepsilon^c = 0,0137 \sigma^{4,58} t e^{-13450/T}$$

Notons de plus que ces résultats confirment le changement de comportement décrit par Dessain et al.. En effet, cette étude a montré qu'un changement de phase solide dans la fibre, passant d'une structure orthorhombique à une structure hexagonale, se produit à 5°C et induit des vitesses de déformations plus importantes lorsque ce seuil est dépassé. Toutefois, cette étude s'était limitée à un domaine de température allant jusqu'à 100°C, ce qui n'était pas suffisamment précis dans le cadre de ce travail. Les essais qui ont été effectués montrent donc que la vitesse de fluage continue de croître exponentiellement jusqu'à la température de fusion de la fibre.

## 3.2 Polyéthylène haute densité moulé par aspiration

Dans le but de simuler le comportement de la structure, il est nécessaire de connaître le comportement du polymère qui constitue la sous couche et assure la continuité de la paroi du réservoir. Si les données sur les propriétés physiques et mécaniques du polyéthylène haute densité sont nombreuses, il n'est pas certain qu'elles décrivent bien le matériau tel qu'il sera sur la structure. En effet, le principe de mise en œuvre basé sur une pression faible conditionne l'arrangement des macromolécules et donc les propriétés du matériau. Des essais doivent donc être pratiqués pour caractériser le matériau obtenu par ce procédé.

L'objectif de la simulation numérique finale étant de prévoir le plus justement possible le déroulement du déconfinement, des essais de traction avec différentes vitesses de sollicitation et différentes températures ont été effectués, ainsi que des essais de fluage, eux aussi à différentes températures.

### 3.2.1 Fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes de traction ont du être fabriquées dans les mêmes conditions que pour la réalisation de la structure. Etant donné qu'un des problèmes récurrents constatés pour les essais sur ce type de matériau est le serrage dans les mors, une géométrie cylindrique a été choisie pour les éprouvettes (figure 3.17). En effet, cela permet de diminuer les risques de glissement dus à l'effet Poisson.

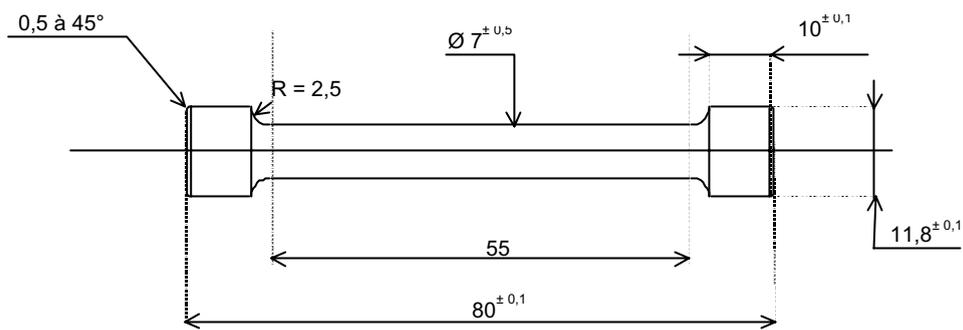


Figure 3.17 : Eprouvettes de traction en PEHD

Pour les fabriquer, on utilise des granulés de polyéthylène qui sont portés à 160°C dans un récipient, puis aspirés dans un tube de silice chauffé, pour éviter une solidification du polymère à son contact. Le résultat après remplissage du tube et refroidissement, est un barreau dont la longueur et la section sont variables en fonction du retrait du polyéthylène.

### 3.2.2 Essais de traction

Les essais de traction qui ont été pratiqués visent deux objectifs : d'une part obtenir le module d'Young du matériau pour plusieurs températures et vitesses de déformation, et d'autre part de déterminer ses propriétés à rupture (contrainte et déformation).

#### 3.2.2.1 Dispositif expérimental

Pour réaliser les essais de traction, on disposait d'une machine ADAMEL LHOMARGY DY 26, équipée d'un capteur de force d'une capacité de 5 kN. Le système de serrage des éprouvettes est constitué de deux paires de demi coupelles. Pour déterminer l'allongement de l'éprouvette il a été nécessaire de placer un extensomètre sur l'éprouvette pour avoir la valeur de sa déformation. La distance entre les couteaux de l'extensomètre avant la déformation est de 25 mm et la course maximale de celui ci est de  $\pm 5$  mm, ce qui autorise une déformation maximale 20%. Dans le cas où elle n'aurait pas été suffisante pour mener un essai à son terme, l'extensomètre aurait été détaché de l'éprouvette, l'essai étant exploitable ensuite grâce à l'acquisition du déplacement de la traverse.

Les essais en température ont été réalisés grâce à une enceinte chauffante régulée en température, permettant d'assurer une bonne homogénéité de température grâce à un système

de ventilation. Afin d'éviter une éventuelle perturbation sur le capteur d'effort (placé à l'extérieur de l'enceinte, mais susceptible de chauffer), l'éprouvette a été montée sur des barres refroidies permettant de garder celui ci à la température extérieure. L'extensomètre quant à lui dispose d'un système de refroidissement par eau.

### 3.2.2.2 Détermination du module d'Young

Des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes de PEHD pour déterminer leur module d'Young à température ambiante, 40°C, 70°C, 85°C, 100°C et 115°C, avec des vitesses de traverse de 0,01 mm/min, 0,1 mm/min, 1 mm/min, 10 mm/min. Afin de ne pas multiplier le nombre d'éprouvettes à fabriquer, chacune d'elle a été testée avec les 6 températures et les 4 vitesses. Pour pouvoir réaliser cela, les essais ont été limités à une déformation très faible, nous donnant le début de la courbe de traction qui nous permet de calculer un module. Les résultats sont présentés à la figure 3.18 sous forme d'un graphique représentant le module en fonction de la température pour les différentes vitesses. Six éprouvettes ayant été testées, chaque point représente une moyenne sur six mesures.

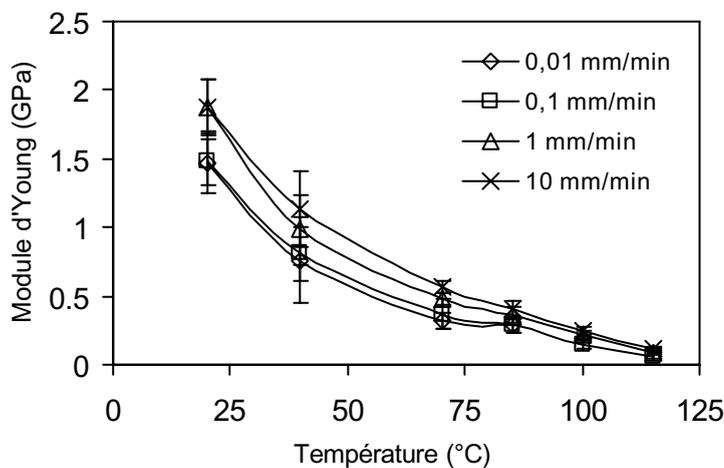


Figure 3.18 : Evolution du module d'Young en fonction de la température

Ces essais nous montrent que la rigidité du polyéthylène décroît progressivement lorsque la température augmente, mais que par contre, la vitesse de déformation a une influence faible sur ces valeurs. De plus, les modules à température ambiante, compris entre 1,5 et 2 GPa sont supérieurs aux valeurs habituelles de ce matériau qui sont plutôt de 1 GPa.

Ces résultats peuvent s'expliquer par une légère orientation des molécules du polymère due au procédé de fabrication.

### 3.2.2.3 Détermination des propriétés à rupture

La deuxième partie des essais concernait la détermination des propriétés de rupture du polyéthylène, ce qui impliquait cette fois de mener les essais jusqu'à leur terme. Etant donné la durée de ces essais, seules les vitesses extrêmes ont été étudiées, aux températures de 20°C, 70°C, 100°C et 115°C. Les résultats tracés à la figure 3.19 indiquent que la contrainte à rupture évolue de la même manière que le module.

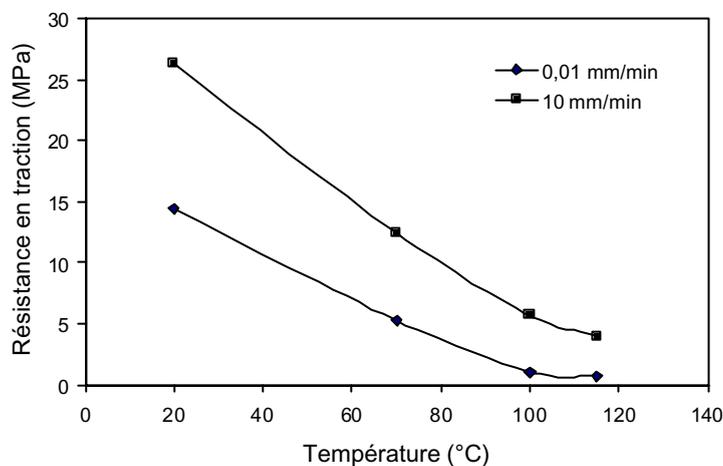


Figure 3.19 : Evolution de la résistance en fonction de la température

En plus de l'évolution en fonction de la température, les résultats exposés montrent la sensibilité à la vitesse de déformation de la résistance en traction. Il apparaît donc que, contrairement au module d'Young, cette propriété dépend fortement de la vitesse de sollicitation.

Les résultats concernant les allongements à rupture présentent une dispersion trop importante pour être exploitables. Ils ne seront donc pas développés ici.

### 3.2.3 Caractérisation au fluage

Un des mécanismes de déconfinement choisi est basé sur une extrusion de la partie centrale des alvéoles au travers du filet de renforcement. Il est donc nécessaire pour procéder

à la simulation de ce phénomène de connaître la vitesse de fluage du polyéthylène en fonction de la contrainte appliquée et de la température.

### 3.2.3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé pour les essais de fluage est le même que pour les essais de traction, c'est à dire l'enceinte chauffante adaptée sur la machine de traction ADAMEL LHOMARGY DY 26, avec le même système de serrage des éprouvettes. Celles ci gardent donc la même géométrie, et sont fabriquées par le même procédé.

Un dispositif a été adapté à ce montage afin de pouvoir accrocher des masses sur la partie inférieure (figure 3.20). Une tige filetée a donc été fixée à la place de la barre inférieure, avec un plateau destiné à supporter les masses.

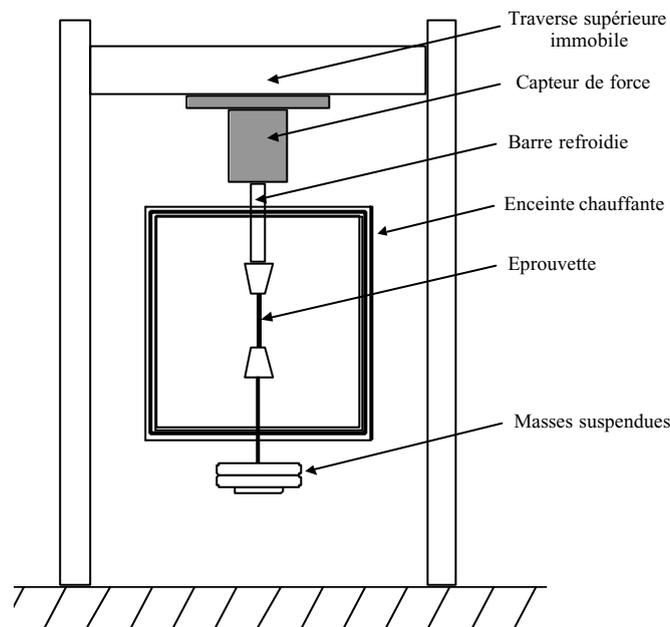


Figure 3.20 : Montage d'essais de fluage sur PEHD

Les déformations sont mesurées directement sur l'éprouvette grâce au même extensomètre refroidi. Le poids du montage de mise en charge devra être pris en compte dans le calcul de l'effort exercé sur l'éprouvette.

### 3.2.3.2 Essais de fluage

Les essais effectués concernent deux niveaux de charge de 3 MPa et 1,7 MPa, choisis assez faibles car dans la structure réelle, les alvéoles n'ont pas d'efforts importants à supporter,

l'essentiel étant supporté par le filet. De plus, trois températures d'étude sont fixées à 70°C, 100°C, et 115°C.

Le but de ces essais est, comme précédemment pour les fibres, de déterminer une loi de fluage de type puissance pour le polyéthylène en vue de la simulation du déconfinement. La constante  $C_2$  relative à l'influence du temps est à nouveau choisie égale à 1. Cette décision est dans ce cas plus approximative dans la mesure où l'on constate que la vitesse de fluage met en général plus de temps à se stabiliser que lors des essais sur filament (figure 3.21). Toutefois, une vitesse constante restera suffisamment représentative du comportement du matériau pour la simulation numérique.

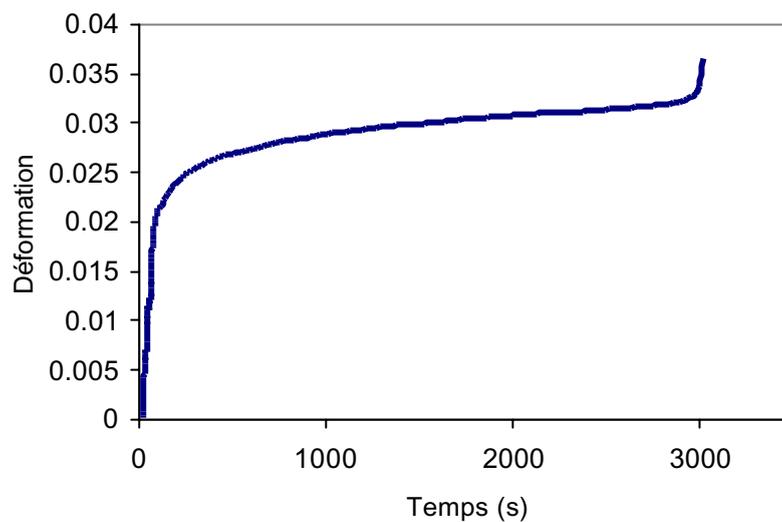


Figure 3.21 : Exemple de courbe de fluage sur PEHD ( $T= 100^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 3 \text{ MPa}$ )

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 3.22 en traçant la vitesse de déformation en fonction de l'inverse de la température, chaque point représentant une moyenne sur plusieurs mesures.

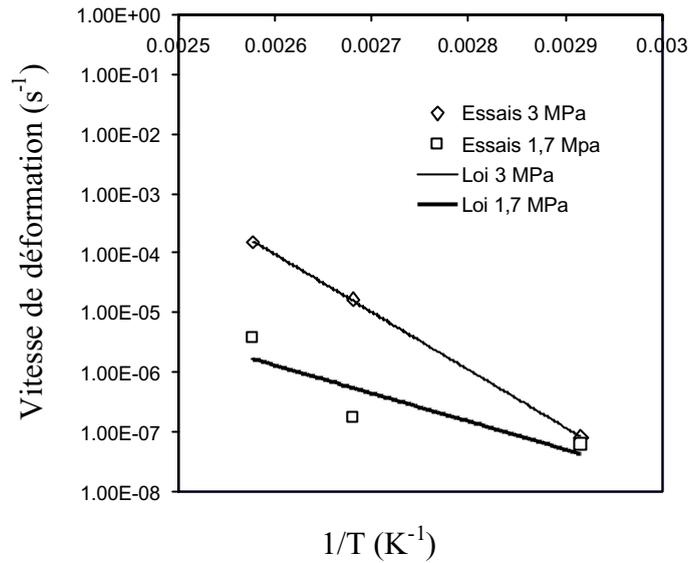


Figure 3.22 : Evolution de la vitesse de déformation en fonction de l'inverse de la température

Etant donné la forte dispersion des mesures, les coefficients de la loi de fluage sont déterminés en tenant compte de tous les points à la fois. On trace donc dans un premier temps le logarithme de la vitesse de déformation en fonction de l'inverse de la température (figure 3.23) pour obtenir la constante  $C_T$  qui sera donnée par la pente.

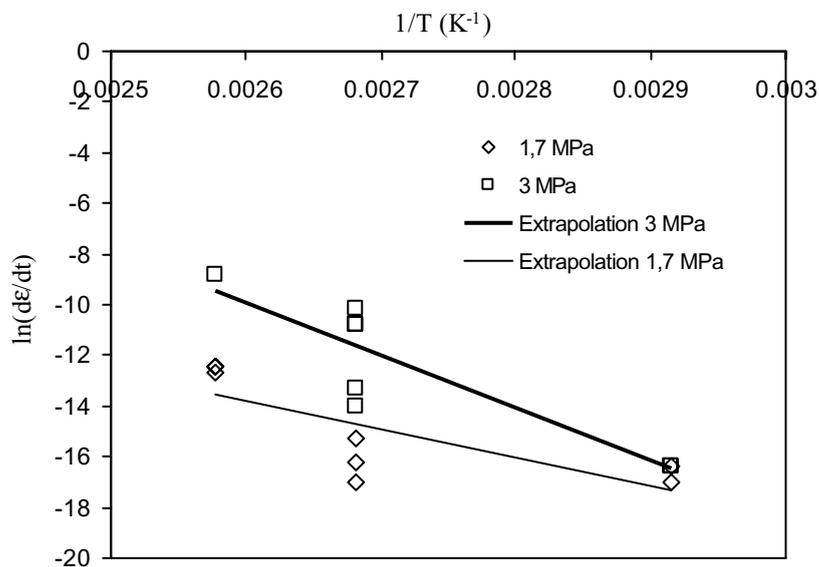


Figure 3.23 : Détermination de  $C_T$

Ensuite, pour déterminer la constante relative à la contrainte, on trace le logarithme de la vitesse de déformation en fonction de celui de la contrainte (figure 3.24).

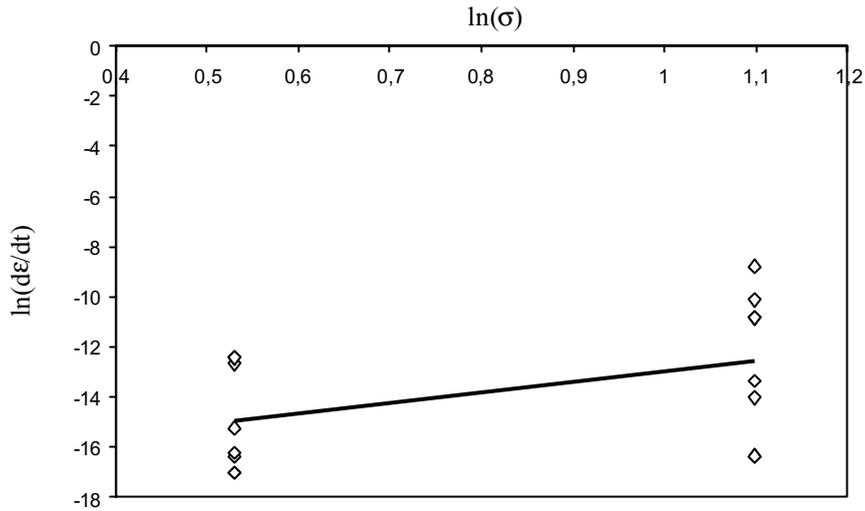


Figure 3.24 : Détermination de  $C_1$

La dernière constante  $C_0$  est ensuite déterminée en utilisant les valeurs de  $C_1$  et de  $C_T$  trouvée précédemment, en faisant une moyenne sur toutes les mesures. On définit donc la loi de fluage du PEHD par l'équation suivante :

$$\varepsilon^c = 6,944.10^{10} \sigma^{7,08} t e^{-16050T}$$

Ces essais nous ont donc permis de déterminer les propriétés du PEHD qui seront nécessaires par la suite pour simuler le déconfinement. Il reste toutefois à procéder à des essais sur le liner pour quantifier sa résistance à une pression interne.

### 3.3 Liner en aluminium

Afin de pouvoir étudier une éventuelle influence du liner sur le comportement global du réservoir, une caractérisation de l'alliage d'aluminium utilisé en feuille a été effectuée dans des conditions s'approchant de celles de l'utilisation. Des essais de mise en pression ont été pratiqués sur des cylindres réalisés avec des feuilles d'aluminium, aux extrémités desquelles ont été fixés des flasques métalliques (figure 3.25).

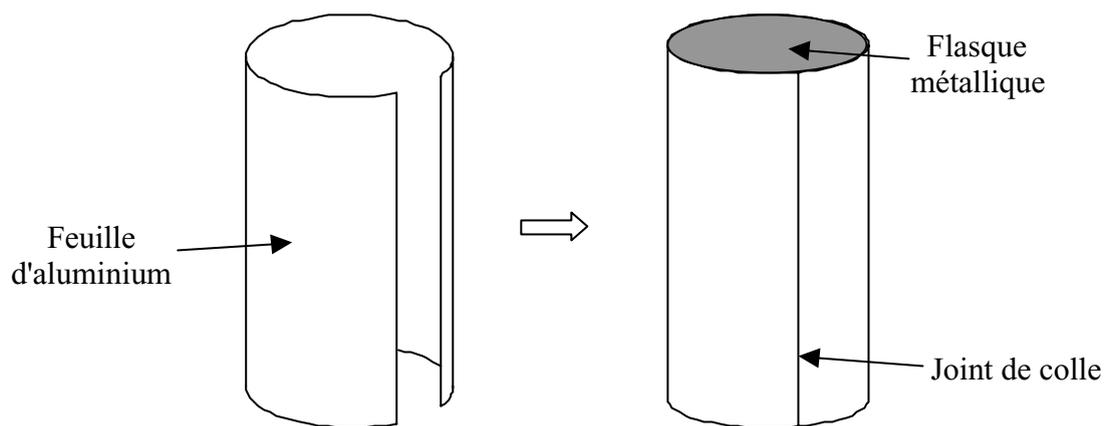


Figure 3.25 : Système de tests du liner sous une pression interne

Le dispositif mis en place permet de relever pour chaque valeur de la pression interne le déplacement radial au niveau du joint de colle, et au point qui lui est diamétralement opposé. Le comportement du liner a ainsi été caractérisé grâce à ces deux points, qui doivent permettre d'encadrer la valeur du déplacement en tout point du cylindre, mais surtout la pression d'éclatement du liner seul.

Le résultat est une pression d'éclatement faible de 3 bars, et un déplacement radial compris entre 0,055 mm pour le joint de colle et 0,1 mm à l'opposé.

### 3.4 Isolant céramique

Dans l'optique de la fabrication du filet de renforcement par bobinage, il était important de vérifier que l'isolant ne peut être endommagé sous l'effet de la tension de la mèche de fibres, nécessaire dans les opérations d'enroulement filamentaire. Un montage d'essais spécifiques illustré à la figure 3.26 a donc été conçu pour évaluer la tension maximale qu'il était possible de donner au fil sans causer de dégradations de l'isolant céramique

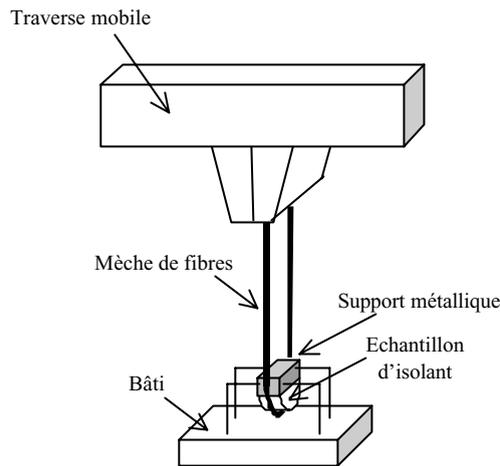


Figure 3.26 : Montage d'essai sur isolant

La mèche de fibres est collée à chaque extrémité sur des talons en carton en suivant la même procédure que pour les essais de tractions. Cette mèche de fibre est placée contre un échantillon circulaire d'isolant placé contre une pièce métallique immobilisée dans un mors de la machine de traction. Les deux talons en carton sont serrés dans le mors mobile de la machine. Le capteur d'effort de la machine permet de déduire la tension de la fibre à chaque instant.

Les résultats de ce type d'essais montrent qu'il existe un palier à partir duquel la mèche commence à pénétrer dans l'isolant. Cet effort, de l'ordre de 70 N, nous permet donc de savoir que la tension dans le fil ne devra pas dépasser  $\frac{70}{n}$  N, avec n le nombre de mèches constituant le filet de renforcement. Même s'il est supposé voisin de 50, le nombre de cycles de bobinage devant être précisé, on peut considérer que la tension dans la mèche ne doit pas dépasser 1 N au cours du bobinage, ce qui est faible.

### 3.5 Conclusion

Les essais de traction réalisés sur les fibres à diverses températures et pour différentes vitesses de sollicitation ont permis d'obtenir les caractéristiques nécessaires à la simulation du comportement du multimatériaux.

Les fortes cristallinité et texture anisotrope de la fibre réduisent considérablement le caractère viscoélastique de leur comportement, mais conduit néanmoins à une chute progressive et non brutale de ses performances lors d'une élévation de la température.

En ce qui concerne le polyéthylène haute densité, il est apparu que le procédé de mise en œuvre par aspiration entraînait une probable orientation des molécules conduisant à des rigidités supérieures aux valeurs habituelles et une moindre sensibilité à la vitesse de sollicitation, c'est à dire un caractère viscoélastique moins marqué. Une loi de fluage a été établie en vue de la simulation du deuxième mécanisme de déconfinement.

La présence du liner d'aluminium conduira à un surcroît de résistance à la pression de l'enveloppe de 3 bars, ce qui ne devrait pas conduire à une contribution négligeable dans le mécanisme de déconfinement.

Enfin, le matériau d'isolation thermique supporterait assez mal une tension de bobinage supérieure à 1 N, ce qui incite à éviter la présence d'isolant sur le fond des rainures dans lesquelles seront bobinées les fibres.

A ce stade de l'étude, l'architecture du multimatériaux a été définie, et les constituants ont été caractérisés, avec pour but de déterminer les propriétés qui gouvernent les fonctions de ce matériau. La détermination de ses paramètres fonctionnels ainsi que la simulation des mécanismes de couplage permettant de réaliser la fonction de déconfinement vont donc pouvoir être effectuées.

## Références bibliographiques

**Andersons J., Joffe R., Hojo M., Ochiai S.**, Glass fibre strength distribution determined by common experimental methods, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 131-145 (2002).

**Barham P.J., Keller A.**, Review : high-strength polyethylene fibres from solution and gel spinning, *Journal of Materials Science*, Vol. 20, pp. 2281-2302 (1985).

**Chi Z., Chou T.W., Shen G.**, Determination of single fibre strength distribution from fibre bundle testings, *Journal of Materials Science*, Vol. 19, pp. 3319-3324 (1984).

**Dessain B., Moulaert O., Keunings R., Bunsell A.R.**, Solid phase change controlling the tensile and creep behaviour of gel-spun high-modulus polyethylene fibres, *Journal of Materials Science*, Vol. 27, pp. 4515-4522 (1992).

**Devaux E., Cazé C.**, Composites of UHMW polyethylene fibres in a LD polyethylene matrix. I – Processing conditions, *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 459-466 (1999).

**Govaert L.E. and Peijs T.**, Tensile strength and work of fracture of oriented polyethylene fibres, *Polymer*, Vol. 36, No. 23, pp. 4425-4431 (1995).

**Hoogsteen W., Van Der Hooft R.J., Postema A.R., Ten Brinke G., Pennings A.J.**, Gel-spun polyethylene fibres – Part 1 : Influence of spinning temperature and spinline stratching on morphology and properties, *Journal of Materials Science*, Vol. 23, pp. 3459-3466 (1988).

**Hoogsteen W., Kormelink H., Eshuis G., Ten Brinke G., Pennings A.J.**, Gel-spun polyethylene fibres – Part 2 : Influence of polymer concentration and molecular weight distribution on morphology and properties, *Journal of Materials Science*, Vol. 23, pp. 3467-3474 (1988).

**Leblans P.J.R. and Bastiaansen C.W.M.**, Viscoelastic properties of UHMW-PE fibres in simple elongation, *Journal of Polymer Science : Part B : Polymer Physics*, Vol. 27, pp. 1009-1016 (1989).

**Pennings A.J., Smook J., De Boer J., Gogolewski S., Van Hutten P.F.**, Process of preparation of ultra-high strength polyethylene fibers, *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 55, No. 5, pp. 777-798 (1983).

**R'Mili M., Bouchaour T., Merle P.**, Détermination des paramètres de Weibull à partir d'essais sur monomèches, *Comptes rendus des JNC 9*, Vol. 2, pp. 1009-1018 (1994).

**R'Mili M., Merle P.**, An improved loose bundle technique for the determination of Weibull parameters, *Proceedings of ICCM-10*, Vol. 6, pp.381-388 (1995).

**R'Mili M., Bouchaour T., Merle P.**, Estimation of Weibull parameters from loose-bundle tests, *Composites Science and Technology*, Vol. 56, pp. 831-834 (1996).

**R'Mili M., Murat M.**, Caractérisation des fibres par amélioration de l'essai sur mèche avec mesure directe de la déformation, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II b*, pp. 355-364 (1997).

**Smith P., Lemstra P.J.**, Ultra-high-strength polyethylene filaments by solution spinning/drawing, *Journal of Materials Science*, Vol. 15, pp. 505-514 (1980).

# Chapitre 4 : Détermination des paramètres fonctionnels du multimatériaux

Etant donné les différentes couches constituant la paroi, chacune ayant un rôle précis et étant composée de matériaux aux comportements mécaniques assez éloignés, les paramètres caractéristiques du multimatériau de la structure sont déterminés en menant des calculs séparés pour le filet de renforcement, la sous couche de PEHD et le liner, sachant que l'isolant n'offre aucune résistance. Les calculs doivent de plus être bouclés car la géométrie donnée au filet de renforcement va influencer le comportement de la couche de PEHD, et va même en définir la sollicitation puisque le but du calcul sera de vérifier que l'on évite bien une rupture du PEHD dans les zones les moins renforcées, c'est à dire au milieu des alvéoles. Ensuite, il faudra quantifier l'influence du liner en aluminium sur la tenue à la pression et vérifier qu'il ne parasite pas le mécanisme de déconfinement à cause de sa meilleure tenue en température que celle du PEHD.

## 4.1 Définition du filet fibreux de renforcement

On pratique un calcul analytique sur le renfort en appliquant la théorie du filet. En effet, on peut considérer que les fibres vont être sollicitées seulement en tension si l'angle de bobinage est approprié. L'absence de sollicitation transversale dans les fibres permettra de minimiser la dimension du faisceau fibreux, et donc de conserver des alvéoles suffisamment grandes pour arrêter la propagation des ondes de choc.

Le principe du calcul est de déterminer l'effort exercé sur chaque partie du renfort en tout point du cylindre. Pour cela, il faut d'abord calculer l'effort global exercé dans la paroi :

$$(a) \text{ effort circonférenciel : } F_{\text{circ}}=2Pr_{\text{int}}L \quad (4.1)$$

avec P : pression interne

$r_{\text{int}}$  : rayon intérieur du cylindre

L : longueur du cylindre

Il convient de noter de plus que cette charge est répartie sur les deux cotés du cylindre

$$(b) \text{ effort axial : } F_{ax} = P\pi r_{int}^2 \quad (4.2)$$

Il est alors nécessaire de connaître le nombre de faisceaux de fibres sur lequel va être répartie cette charge totale. Les paramètres de la structure qui n'ont pas encore été fixés vont donc intervenir dans ce calcul. Ce sont ces paramètres qui permettront ensuite d'ajuster le dimensionnement. Ces deux paramètres, illustrés par la figure 4.1, sont la largeur de la cellule  $\alpha$  élémentaire et l'angle de bobinage  $\theta$ .

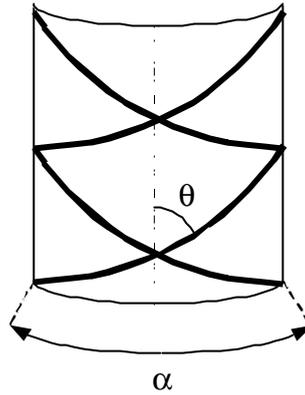


Figure 4.1 : Paramètres de dimensionnement

Ayant défini ces grandeurs, on peut calculer en fonction de  $\alpha$  et de  $\theta$  le nombre de cellules qu'il est possible de juxtaposer le long de l'axe du cylindre :

$$n_{cellules}^{axe} = \frac{L \times \tan \theta}{r\alpha} \quad (4.3)$$

De même, il nous faut calculer le nombre de cellules qu'il est possible de disposer sur la circonférence du cylindre :

$$n_{cellules}^{circ} = \frac{2\pi}{\alpha} \quad (4.4)$$

Le nombre de faisceaux de fibres débouchants est donc :

$$\text{- suivant l'axe du cylindre : } n_{faisceaux}^{axe} = 2n_{cellules}^{axe} \quad (4.5)$$

$$\text{- suivant la circonférence : } n_{faisceaux}^{circ} = 2n_{cellules}^{circ} \quad (4.6)$$

Cette donnée permet à l'aide de (4.1) et (4.2) de calculer l'effort supporté par un faisceau de fibres (figure 4.2).

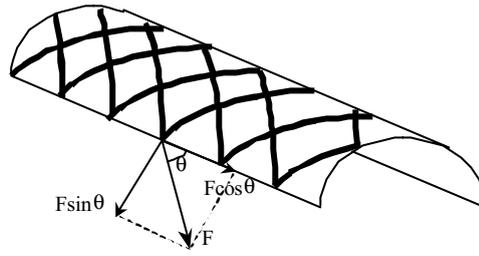


Figure 4.2 : Décomposition de l'effort suivant les axes de symétrie

$$\text{On a donc : } F \sin \theta = \frac{F_{circ}}{n_{faisceaux}^{axe}} = \frac{Pr_{int}^2 \alpha}{\tan \theta} \quad (4.7)$$

$$\text{et } F \cos \theta = \frac{F_{ax}}{n_{faisceaux}^{circ}} = \frac{Pr_{int}^2 \alpha}{4} \quad (4.8)$$

De ces deux relations, on peut déduire la valeur de l'angle de bobinage  $\theta$  à utiliser pour que les fibres soient seulement sollicitées dans le sens longitudinal :

$$\tan^2 \theta = 4 \quad \theta = 63,4^\circ \quad (4.9)$$

Connaissant l'angle de bobinage  $\theta$ , on peut calculer l'effort de tension dans chaque faisceau de fibres en fonction de la largeur des cellules  $\alpha$ , et en déduire la contrainte correspondante en fonction de la largeur de ces faisceaux, leur profondeur étant prise constante et égale à 7 mm.

$$F = \frac{Pr_{int}^2 \alpha}{\tan \theta \sin \theta} \quad (4.10)$$

Ce résultat permet de calculer la contrainte dans les fibres en fonction de la taille des alvéoles et de la largeur du renfort. On peut alors définir un rapport indiquant, pour une taille de cellule donnée, la largeur minimale du réseau de renforcement pour que cette contrainte puisse être supportée par la fibre.

$$\frac{\ell}{a} \geq \frac{Pr_{int}^2}{e \sigma_{adm} \tan \theta \sin \theta} \quad (4.11)$$

Ce rapport permet de choisir les valeurs de la taille de cellule et de la largeur de renfort avec pour but d'obtenir des proportions convenables, c'est à dire des alvéoles suffisamment grandes pour jouer un rôle de déstructuration des chocs et des faisceaux de fibres fins par rapport aux dimensions de la cellule.

Ces calculs de prédimensionnement du filet étant posés, il faut maintenant déterminer une taille pour les alvéoles. Le critère de choix pour le paramètre caractéristique  $\alpha$  ne sera pas

lié au renfort lui même, mais plutôt à la sous couche de PEHD dont l'épaisseur est fixée à 3 mm et qui ne doit pas rompre sous l'effet de la pression interne de 30 bars.

## 4.2 Simulation du comportement à froid de la couche de PEHD

Il a été montré dans le paragraphe précédent que quelle que soit la taille de la maille du filet qui sera choisie, il sera possible de trouver une largeur de faisceau fibreux supportant les efforts dus à une pression interne de 30 bars. Toutefois, il existe une taille de maille maximale à partir de laquelle la couche de PEHD située sous le filet de renforcement rompra dans les zones non renforcées, c'est à dire au centre des alvéoles, ou risquera d'être extrudée au travers du filet. La largeur de la maille va donc être définie par rapport au comportement de la paroi non renforcée.

Ce dimensionnement n'étant pas possible par un calcul analytique, il faut avoir recours à une simulation par éléments finis, en tenant compte du caractère viscoélastique du PEHD. Dans cette modélisation, seule la couche de PEHD sera représentée, la présence du réseau fibreux étant simulée par le blocage de différents déplacements. Cette simplification ne rendant pas compte de la sollicitation exacte, il sera nécessaire de bien définir les hypothèses prises et leurs répercussions sur le modèle.

La couche de PEHD est modélisée avec la géométrie telle qu'elle a été conçue précédemment, c'est à dire sous la forme d'un losange s'inscrivant sur une surface cylindrique. Le rôle exact joué par les fibres lors de la mise sous pression étant difficile à définir, plusieurs cas sont étudiés, où seules les conditions aux limites imposées à la périphérie de l'alvéole changent. Ainsi dans un premier temps, l'action des fibres sur la partie centrale de l'alvéole peut être assimilée à des appuis simples (figure 4.3).

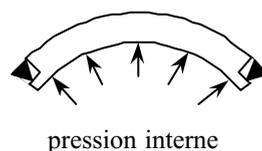


Figure 4.3 : Modèle avec appuis simples

Dans ce cas, des mouvements de rotation de la couche de PEHD par rapport aux fibres étant possibles, le résultat obtenu peut représenter le comportement de la structure dans le cas où l'épaisseur de polymère au droit des fibres est faible.

Dans un second temps, on modélise l'action des fibres par des encastrements, ce qui reviendrait à considérer une forte épaisseur de matrice au droit des fibres (figure 4.4).

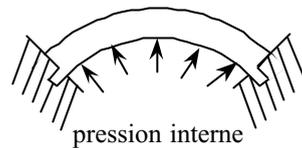


Figure 4.4 : Modèle avec encastrements

Afin de dimensionner le renfort, on étudie donc les contraintes dans la matrice en fonction de la taille de la maille élémentaire, de manière à choisir un filet suffisamment resserré pour éviter une rupture de la matrice entre les fibres.

Ces courbes (figure 4.5) montrent que la contrainte dans la matrice atteint rapidement un niveau élevé pour le polyéthylène lorsqu'on augmente la taille de la cellule. En effet, sachant que la limite d'élasticité du PEHD est de 20 MPa, on constate que la taille de la cellule ne doit pas excéder 15°.

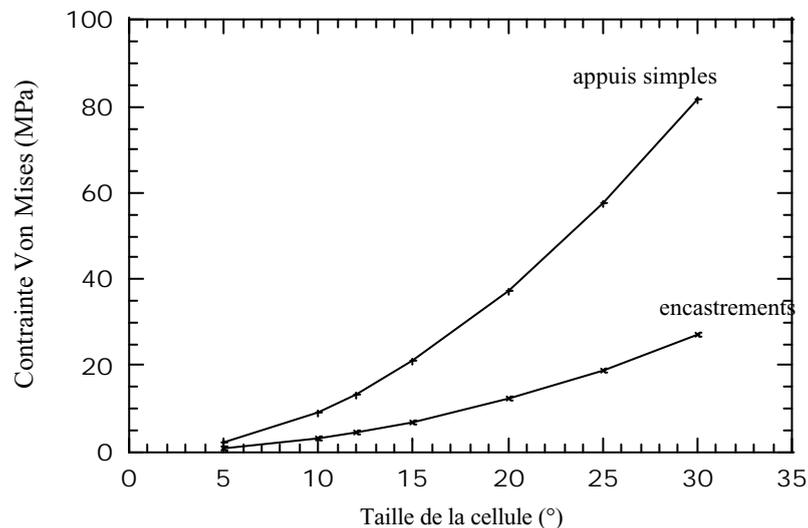


Figure 4.5 : Evolution de la contrainte dans la matrice en fonction de la taille de la cellule

Une fois que les sollicitations subies par les fibres et par les alvéoles ont été analysées, modélisées et paramétrées en fonction de la géométrie, il faut les regrouper pour définir les dimensions de la structure.

### **4.3 Choix des paramètres dimensionnels du multimatériaux**

Les données concernant les dimensions à attribuer au filet de renforcement et aux alvéoles sont connues. Il s'agit donc maintenant de les regrouper pour définir la géométrie de cette structure.

Le critère permettant de choisir les dimensions découle du cahier des charges fonctionnel. En effet, pour qu'une structure alvéolaire permette de déstructurer une onde de choc, il faut que la taille des alvéoles soit du même ordre de grandeur que le projectile. Il faut donc arriver à trouver une maille qui assure la tenue de l'ensemble vis à vis de la pression interne, tout en restant de taille centimétrique, et sans que la proportion de fibres ne devienne trop importante par rapport à la zone non renforcée. Notons qu'une contrainte supplémentaire n'a pas été prise en compte jusque là : la taille de cette maille doit être un diviseur de 360, pour avoir un nombre entier de cellules sur la circonférence du cylindre.

Il a été vu précédemment que pour éviter une rupture de la couche de PEHD, il fallait que la largeur de la cellule reste inférieure à  $15^\circ$ . Une cellule de  $12^\circ$  permettrait ainsi de conduire à une contrainte théorique de 13 MPa au maximum, en ayant une largeur de cellule de l'ordre de 15 mm, ce qui respecte bien les critères de sélection énoncés plus haut. Cette dimension est donc choisie pour l'alvéole, avec une largeur minimale de faisceau fibreux correspondante de 0,1 mm.

Ce premier calcul étant effectué, il est possible d'affiner la valeur de la contrainte obtenue en s'intéressant aux différences qui peuvent apparaître dans l'épaisseur de cette zone fibreuse. En effet, en considérant l'épaisseur constante au cours de la déformation de la structure, on peut estimer la valeur de la déformation longitudinale des fibres.

Ainsi, pour une augmentation de rayon  $\Delta R$ , l'allongement des fibres va être de  $2\pi(r+\delta R)-2\pi r=2\pi\delta R$ . La déformation correspondante pour une fibre située à une distance  $r$  de

l'axe du cylindre sera donc :  $\varepsilon = \frac{\Delta R}{r}$ . La déformation subie par les fibres situées le plus près de l'axe, dans les couches inférieures du bobinage sera donc plus importante.

On peut ensuite exprimer l'effort normal dans les fibres en fonction de cette dilatation  $\Delta R$  de la paroi :

$$N_f = \int_{R_i}^{R_e} \sigma_f \ell dr = \int_{R_i}^{R_e} E_f \varepsilon \ell dr = \int_{R_i}^{R_e} E_f \frac{\Delta R}{r} \ell dr = E_f \ell \Delta R \ln \left( \frac{R_e}{R_i} \right) \quad (4.12)$$

avec  $\sigma_f$  : contrainte dans les fibres

$\ell$  : largeur du faisceau de fibres

$E_f$  : module d'Young des fibres

$\varepsilon$  : déformation des fibres

En écrivant l'égalité de (10) et (11), on obtient la valeur de  $\Delta R$  pour la structure considérée :

$$\Delta R = \frac{F}{E_f \ell \ln \left( \frac{R_e}{R_i} \right)} \quad (4.13)$$

Sachant que les faisceaux de fibres auront une profondeur de 7 mm, cela conduit à une variation de déformation, et donc de contrainte si on considère que l'on reste dans le domaine d'élasticité, de 10 %. Cet écart n'étant pas négligeable, il sera nécessaire de le prendre en compte pour le choix des dimensions.

## 4.4 Comportement du liner

Les dimensions de la structure étant définies, il faut évaluer l'influence du liner en aluminium sur le comportement en déformation du réservoir. En effet, celui ci risque de freiner voire d'empêcher le mécanisme de déconfinement à cause de la meilleure tenue en température du métal, mais peut aussi améliorer la tenue à la pression interne de 30 bars, puisque nous avons déjà vu que les performances de l'alliage d'aluminium choisi conduisait le liner à résister à une pression de 3 bars.

#### 4.4.1 Déformation sous la pression de 30 bars

La pression interne maximale de 30 bars qui doit être appliquée risque de poser des problèmes importants. En effet, lors des essais sur le matériau du liner, la déformation maximale supportée par le liner était de 0,2%, ce qui est faible comparativement à ce que peuvent supporter les fibres de polyéthylène.

Sachant que la plus grande partie des efforts sera reprise par le filet de renforcement, il faut savoir quelle va être la déformation subie par ce dernier sous l'effet de la pression. On suppose donc que le liner, comme la couche de PEHD, viendra se plaquer sur les fibres sous l'effet de la pression.

Connaissant le module d'Young de l'aluminium, on peut évaluer la raideur du liner dont l'épaisseur est de 0,1 mm, et ainsi estimer la déformation qu'il va subir. On arrive après ce calcul à une déformation de 1,2% dans le sens circonférentiel, ce qui signifie qu'une mise sous pression de 30 bars risque d'entraîner une plastification ou une rupture du liner. La conséquence de ce calcul est que les montages d'essais, initialement prévus pour effectuer chacun une vérification de tenue à la pression et un test de déconfinement ne pourront servir que pour un des essais, puisqu'une fois la pression interne abaissée, le liner sera plastifié.

La tenue à la pression de 30 bars risque d'autant plus d'être un problème que dans ce calcul, on a supposé que la paroi se déformait uniformément, ce qui ne sera pas le cas puisque les parties non renforcées (au centre des alvéoles) se déformeront plus.

Il était donc important d'effectuer cette vérification car elle risque de conduire à une augmentation du nombre de prototypes à fabriquer pour la phase expérimentale finale.

Les paramètres dimensionnels du multimatériaux ont donc été identifiés, et leurs valeurs fixées. Ce choix s'est fait grâce à une analyse du comportement de chacune de ses parties, de manière à déterminer la sollicitation gouvernant ce dimensionnement. En suivant une démarche de conception classique, une étude de variabilité sur ces différents paramètres aurait permis de préciser ou de confirmer les choix effectués. Toutefois dans le cas présent, elle s'avérait peu utile, étant donné que des courbes de variation des contraintes en fonction des paramètres étaient déjà tracées.

## **4.4.2 Influence du liner sur le déconfinement**

La présence dans la structure d'un liner métallique oblige à s'assurer qu'il ne va pas interférer avec le mécanisme de déconfinement en l'empêchant ou le ralentissant. Les tests de mise en pression effectués sur le liner seul ont conduit à une pression d'éclatement de 3 bars, avec un déplacement radial maximal ne dépassant pas 0,1 mm. Cela montre donc que la pression d'environ 4 bars, acceptable pour assurer le déconfinement, est suffisante pour rompre cette première enveloppe.

## **4.5 Simulation du déconfinement**

A ce stade de l'étude, la phase de définition des attributs du réservoir est terminée. Il faut donc, d'après la méthode qui a été définie, procéder à une simulation analytique ou numérique pour vérifier le bon comportement de la pièce vis à vis des autres fonctions qui sont attendues. Dans notre cas, cette simulation consiste en une étude du déconfinement de façon à s'assurer de la pertinence des mécanismes qui ont été imaginés et estimer le temps nécessaire pour remplir cette fonction.

### **4.5.1 Principe des calculs effectués**

Le but de ces calculs est d'arriver à évaluer la performance du réservoir dans sa fonction de déconfinement. Pour pouvoir construire les modèles analytiques correspondants, les mécanismes rendant cette fonction possible doivent être analysés pour décrire précisément les sollicitations subies par chaque partie de la paroi. Une fois que les différents chargements sont définis, une approche générale de ces calculs peut être mise en place.

#### **4.5.1.1 Mécanismes de déconfinement**

L'étude menée au chapitre 2 a conduit à la définition d'un réservoir (figure 4.6) dont les différents constituants ont, de part leur nature et leur emplacement dans la paroi, chacun un ou plusieurs rôles à jouer.

Cette structure a été conçue pour combiner deux mécanismes de déconfinement qui reposent sur :

- (1) une chute brutale des propriétés mécaniques de la paroi qui rend possible une rupture sous l'effet d'une pression interne faible,
- (2) l'apparition de porosités ou de trous dans la paroi qui autorisent la fuite du liquide contenu.

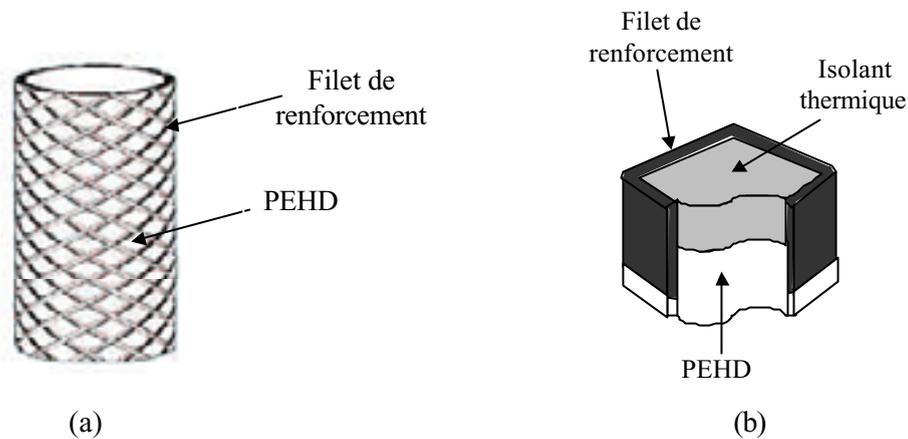


Figure 4.6: Représentation schématique de la structure alvéolaire du réservoir

(a) forme générale

(b) coupe suivant l'épaisseur

Le déconfinement viendra donc d'une part de la chute des performances des fibres de polyéthylène quand la température augmente et de la capacité de la couche de PEHD à être extrudée au travers du filet de renforcement.

La simulation du déconfinement consistera donc à étudier ces deux mécanismes séparément dans un premier temps afin de comparer leur rapidité et savoir si un d'eux est prédominant par rapport à l'autre. Ensuite, une simulation plus complète étudiera ces deux mécanismes simultanément.

#### 4.5.1.2 Couplage thermomécanique

La simulation du déconfinement oblige à prendre en compte à la fois les chargements thermiques et mécaniques puisque cette fonction doit répondre à une hausse brutale de température extérieure. Modéliser un tel phénomène implique donc de connaître la répartition des températures dans la paroi et dans l'explosif puisque celles ci déterminent les propriétés du matériau et la valeur de la pression interne.

Toutefois, pour alléger les calculs, les deux problèmes peuvent être découplés en effectuant tout d'abord une étude des transferts thermiques dans la structure, puis un calcul numérique ou analytique des contraintes utilisant les valeurs de la pression interne et des propriétés des constituants déduits des températures déterminées à chaque instant.

Par la suite, une simulation complète du déconfinement pourra être effectuée grâce à un modèle éléments finis suivant le principe exposé à la figure 4.7.

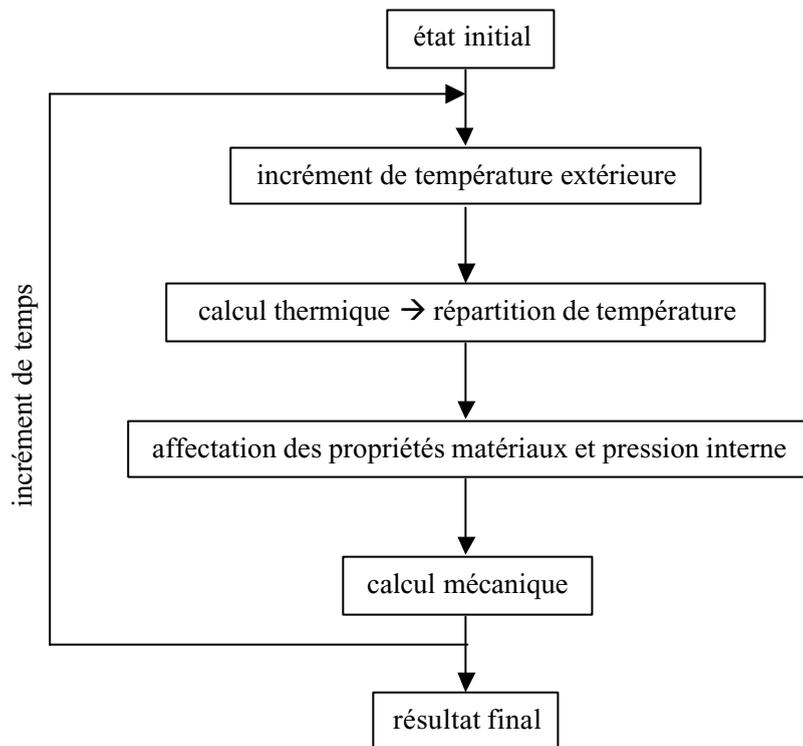


Figure 4.7 : Principe d'une simulation complète du déconfinement

#### 4.5.1.3 Analyse du comportement de la structure

Durant la conception et le dimensionnement de la structure, il a été supposé que la partie la plus importante de la tenue mécanique est fournie par le filet de renforcement. Les dimensions caractéristiques du renfort ont donc été déterminées suivant deux critères :

- (1) le filet doit pouvoir supporter seul les effets de la pression interne de 3 MPa,
- (2) la taille des mailles du filet doit être assez petite pour éviter une extrusion de la couche de PEHD sous une pression interne de 3 MPa.

Cette analyse montre bien que le rôle de chaque composant de la structure est différent. La pression interne va donc être à l'origine de sollicitations variées suivant la partie

du réservoir que l'on étudie. La simulation de chaque mécanisme de déconfinement est donc effectuée en modélisant la partie de la structure concernée avec le chargement correspondant.

La comparaison entre les deux mécanismes pourra éventuellement conduire à un ajustement des dimensions de la structure pour s'assurer que l'un des mécanismes ne soit si rapide par rapport au second qu'il le rende inopérant et inutile.

#### 4.5.1.4 Simulation des transferts de chaleur

Le but de la simulation des transferts thermiques dans le réservoir est d'obtenir la répartition de température dans l'épaisseur de la paroi en fonction du temps. La structure est représentée par un domaine constitué d'une partie fibreuse, de la couche de PEHD et des alvéoles de préforme isolante (figure 4.8). Le liner étant d'une très faible épaisseur (0,1 mm) et constitué d'aluminium, matériau caractérisé par une bonne conductivité thermique, son rôle est négligé pour ce calcul.

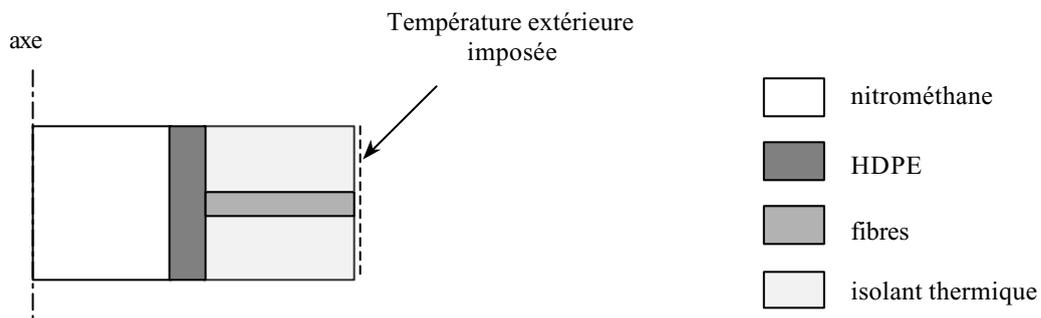


Figure 4.8 : Élément représentatif de la paroi du réservoir pour le calcul des transferts thermiques

La simulation est réalisée grâce à un modèle éléments finis, le domaine étant maillé avec des éléments axisymétriques. De plus, le calcul ne tient compte que des échanges par conduction, négligeant donc les transferts par convection dans le nitrométhane. Afin de ne pas la sous-estimer, la température de ce dernier est relevée à l'interface avec la couche de PEHD

La montée en température est imposée sur les nœuds situés sur la surface extérieure en considérant trois vitesses de variation : de 0 à 1000°C en 10 secondes, en 1 minute et en 10 minutes. Ne connaissant pas précisément les conditions réelles correspondant à un incendie, ces trois cas devraient permettre d'encadrer les conditions envisageables.

## 4.5.2 Ruine du filet de renforcement

Pour étudier ce premier mécanisme de déconfinement, deux simulations sont effectuées, en considérant le faisceau de fibres comme sollicité de manière homogène ou en le discrétisant. Le deuxième calcul permettra d'utiliser une loi de comportement de la fibre plus proche de la réalité.

### 4.5.2.1 Faisceau de fibres sollicité de manière homogène

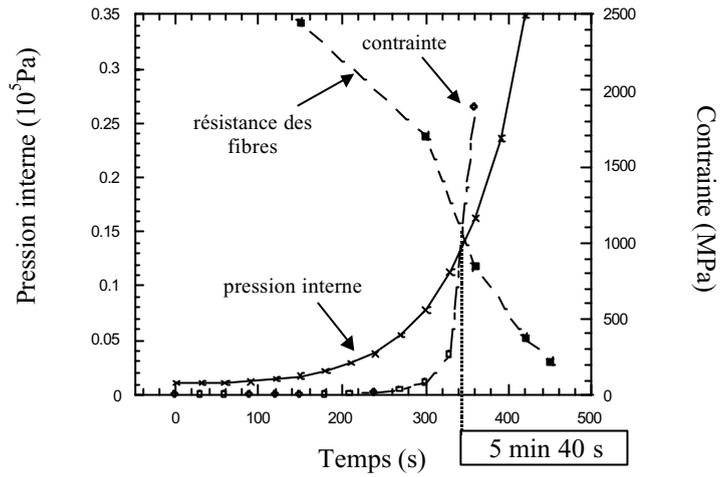
Pour cette première simulation, le faisceau fibreux est considéré comme homogène dans son épaisseur, ce qui signifie que la contrainte reste constante sur toute la section droite. Le filet ayant été dimensionné pour n'être sollicité qu'en tension, la théorie du filet appliquée lors de cette phase nous donne la valeur de cette contrainte en fonction de la pression interne :

$$\sigma_f = \frac{Pr^2 \alpha}{S_f \tan \theta \sin \theta} \quad (4.14)$$

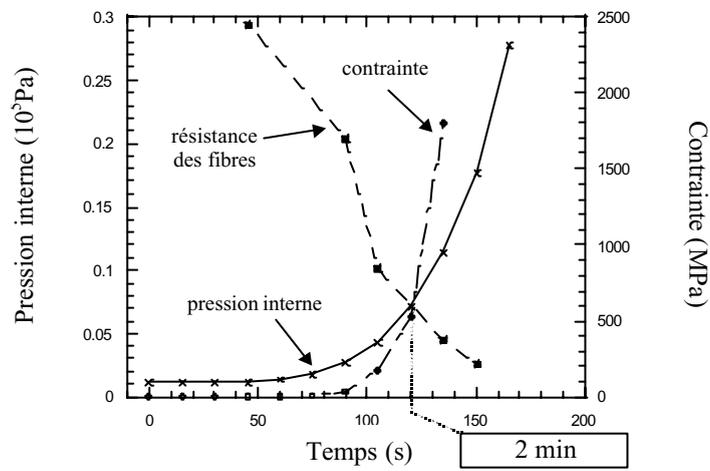
- où P est la pression interne (Pa),  
r le rayon interne du réservoir (m)  
 $\alpha$  l'angle représentant la largeur des mailles du filet de renforcement (rad),  
 $S_f$  la section du faisceau de fibres (m<sup>2</sup>),  
 $\theta$  l'angle de bobinage des fibres (rad).

La fusion des fibres situées le plus à l'extérieur est prise en compte en diminuant la valeur de  $S_f$ , qui est définie comme la section de fibres dont la température est inférieure à 100°C.

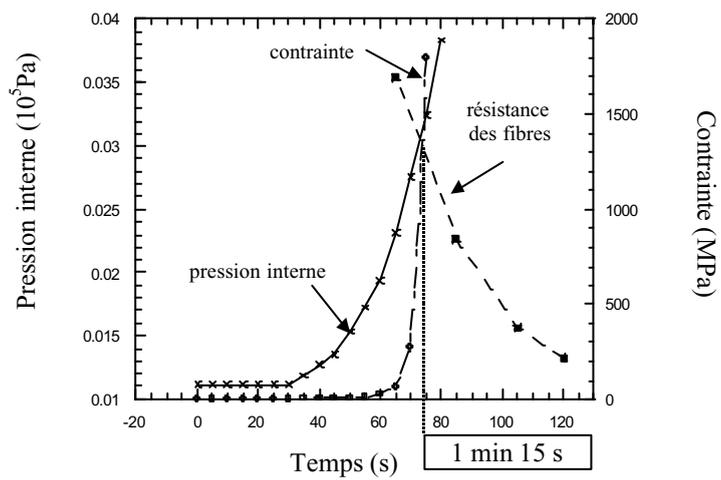
Pour valider le mécanisme de déconfinement, la contrainte calculée est comparée, à chaque pas de temps, à la résistance de la fibre à la température correspondante obtenue grâce aux essais réalisés au chapitre 3. De plus, il est important de vérifier que la valeur de la pression interne au moment du déconfinement n'atteigne pas un niveau suffisamment élevé pour provoquer une rupture violente du réservoir. Les résultats obtenus par cette méthode sont présentés à la figure 4.9.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.9 : Simulation du comportement du faisceau fibreux considéré comme homogène montée en température (a) en 10 minutes, (b) en 1 minutes, (c) en 10 secondes

Cette première simulation donne une évaluation du temps nécessaire pour le déconfinement. Les résultats obtenus indiquent que la durée de cette opération ne dépasse pas 6 minutes pour la montée la plus lente, et moins de 2 minutes pour les deux autres. De plus, dans tous les cas, la pression interne reste inférieure à 0,2 bars, ce qui est suffisamment faible pour éviter une explosion du réservoir. Ces résultats montrent donc que le mécanisme de déconfinement basé sur la rupture des fibres est efficace.

#### 4.5.2.2 Faisceau de fibres sollicité de manière non homogène

Si les résultats de la première simulation sont satisfaisants, les hypothèses sur lesquelles elle repose sont très restrictives, puisque la contrainte et la température ne seront certainement pas réparties uniformément dans toute l'épaisseur, donc les propriétés ne seront pas non plus les mêmes en tout point.

Pour affiner les prédictions précédentes, la partie fibreuse est maintenant divisée en couches de 0,5 mm d'épaisseur. L'avantage de cette méthode est, en plus de remédier aux défauts du premier calcul, de prendre en compte le comportement anélastique des fibres de polyéthylène au dessus de 70°C, en le représentant par un domaine linéaire élastique et un domaine plastique parfait (figure 4.10).

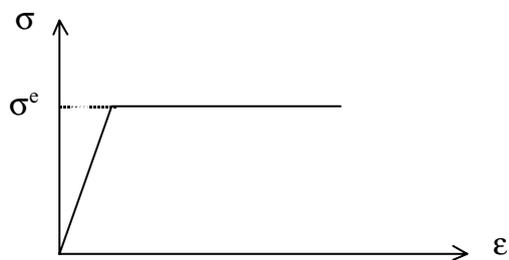


Figure 4.10 : Représentation schématique du comportement anélastique des fibres de polyéthylène

Contrairement à la simulation précédente, l'influence de la température sur les propriétés mécaniques, particulièrement sur la rigidité et la résistance, est prise en compte. Pour cela, on utilise les valeurs trouvées lors de la phase de caractérisation des fibres auxquelles on ajoute une fonction d'interpolation pour avoir ces propriétés sous forme d'une fonction continue de la température sur le domaine d'étude.

La précision apportée par cette simulation est nécessaire à l'évaluation de ce mécanisme car l'écoulement plastique des fibres risque de retarder le déconfinement par

rapport à ce qui était prévu précédemment. L'efficacité de la structure vis à vis de cette fonction pourrait ainsi être remise en question. Il faut donc vérifier, avec ces nouvelles hypothèses plus réalistes, que la structure permet bien d'éviter une explosion.

Cette deuxième approche de la modélisation du comportement de la paroi du réservoir est basée sur la répartition non uniforme de l'effort de tension exercé sur le faisceau fibreux. Cet effort peut en effet être écrit comme la somme des efforts exercés sur chaque couche de fibres :

$$N_z = \sum_i \sigma_i l \Delta e \quad (4.15)$$

où  $\sigma_i$  est la contrainte dans la  $i^{\text{me}}$  couche,

$l$  la largeur du faisceau fibreux

$\Delta e$  l'épaisseur d'une couche

En suivant la loi de comportement qui a été adoptée dans ce paragraphe, la contrainte de traction  $\sigma_i$  peut être considérée égale à :

- $E_i \varepsilon_i$  dans le cas où elle est inférieure à la contrainte d'écoulement  $\sigma_i^e$
- $\sigma_i^e$  si la fibre est sollicitée dans le domaine plastique

Ainsi, en considérant que la déformation des fibres est  $\varepsilon_i = \frac{\Delta R}{r_i}$ , où  $R$  est le rayon du réservoir et  $r_i$  celui de la  $i^{\text{me}}$  couche de fibre, il est possible de calculer le déplacement radial (considéré comme constant dans le domaine, l'épaisseur de la paroi étant considérée comme invariante) à partir de l'équation suivante :

$$\Delta R = \frac{N_f - \sum_i \sigma_i^e l \Delta e}{\sum_i \frac{E_i l \Delta e}{r_i}} \quad (4.16)$$

Ce calcul du déplacement radial de la paroi permet de définir la répartition des contraintes dans l'épaisseur de la zone fibreuse, en déterminant les couches dont le seuil d'écoulement a été dépassé. Pour cela, plusieurs itérations à chaque pas de temps peuvent être nécessaires comme le montre l'algorithme de calcul représenté à la figure 4.11.

Les contraintes sont calculées dans un premier temps en supposant un comportement élastique de toutes les couches. Si les contraintes obtenues sont supérieures à la limite d'élasticité  $\sigma^e$ , le calcul doit être renouvelé en posant cette contrainte égale à  $\sigma^e$  pour déterminer la surcharge sur les autres couches qui en découle. Si cette surcharge ne suffit pas à provoquer de déformations plastiques dans d'autres couches, un incrément de temps est

effectué, définissant de nouvelles conditions (répartition de température, pression interne) mais en conservant les couches qui s'écoulaient au pas de temps précédent en l'état.

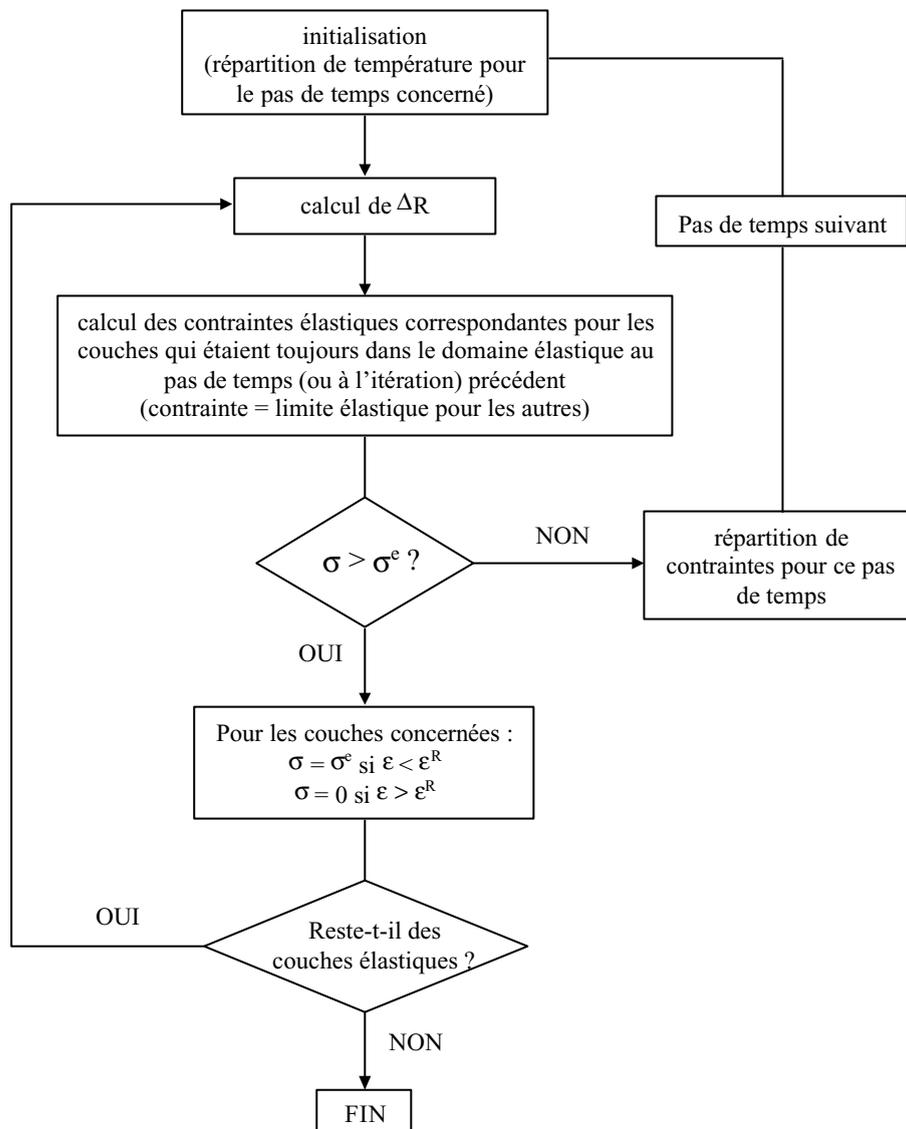


Figure 4.11 : Algorithme utilisé pour la simulation du comportement du filet de renforcement

Comme pour le premier calcul, trois montées en température sont simulées. Les résultats observés, présentés dans le tableau 4.1, sont à nouveau le temps nécessaire pour le déconfinement et la valeur de la pression interne au moment où celui ci se produit.

Vitesse de montée en température	100°C/min	1000°C/min	6000°C/min
Temps de déconfinement (s)	420	120	90s
Pression interne (bar)	0,3	0,07	0,05

Tableau 4.1 : Résultats de la simulation avec comportement élastoplastique

Ces résultats confirment les tendances observées lors de l'étude précédente puisque les durées et les pressions sont suffisamment faibles pour considérer la réalisation de la fonction comme satisfaisante. De plus, il semble intéressant de noter que le déconfinement se produit avant que les fibres n'atteignent leur limite d'élasticité. En effet, le gradient de température dans la paroi, dû au caractère isolant des matériaux qui ont été choisis, est si important que les fibres situées sur les couches extérieures fondent avant que la pression ne soit à un niveau significatif.

### 4.5.3 Rupture de la couche de PEHD

Le but de cette simulation est d'évaluer le deuxième mécanisme de déconfinement qui repose sur l'extrusion de la sous couche de PEHD au travers des mailles du filet de renforcement. Ce calcul doit donc représenter une sollicitation de flexion due à la pression interne exercée sur la couche de PEHD maintenue en place par un filet beaucoup plus raide.

Pour modéliser ce phénomène, on a considéré un domaine représentant une alvéole (figure 4.12), soumis à une pression interne et dont la périphérie était encadrée.

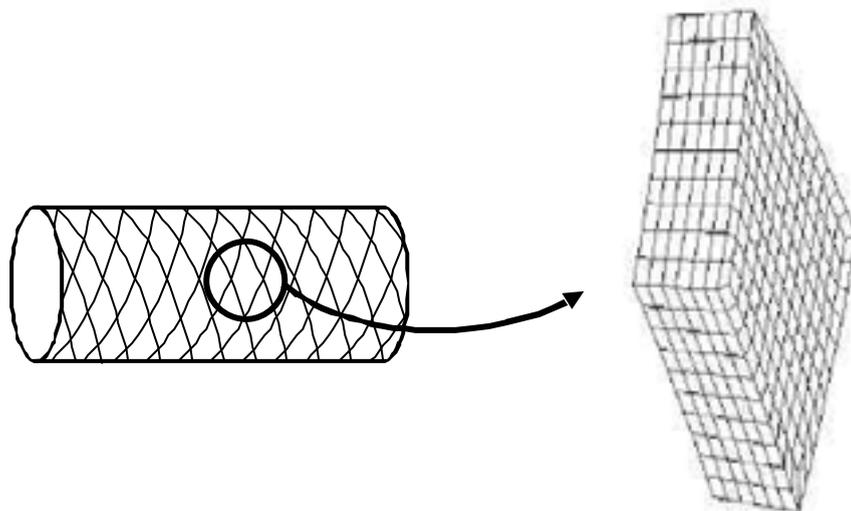


Figure 4.12 : Maillage d'une alvéole

La simulation par éléments finis de ce mécanisme permet de prendre en compte le fluage du PEHD, en lui attribuant la loi trouvée au chapitre 3. Ce calcul est à nouveau effectué pour les trois vitesses de montée en température. Les résultats obtenus, en termes de vitesse de déconfinement et de pression interne, sont présentés au tableau 4.2.

Vitesse de montée en température	100°C/min	1000°C/min	6000°C/min
Temps de déconfinement (s)	420	135	110
Pression interne (bar)	0,4	0,13	0,11

Tableau 4.2 : Résultats de la simulation de la rupture de la couche de PEHD

Ces calculs montrent aussi que le fluage a peu d'influence sur le déroulement de ce mécanisme de déconfinement. En effet, la courbe d'évolution de la contrainte en fonction du temps met en évidence des phénomènes de relaxation sur les couches situées les plus à l'extérieur (figure 4.13).

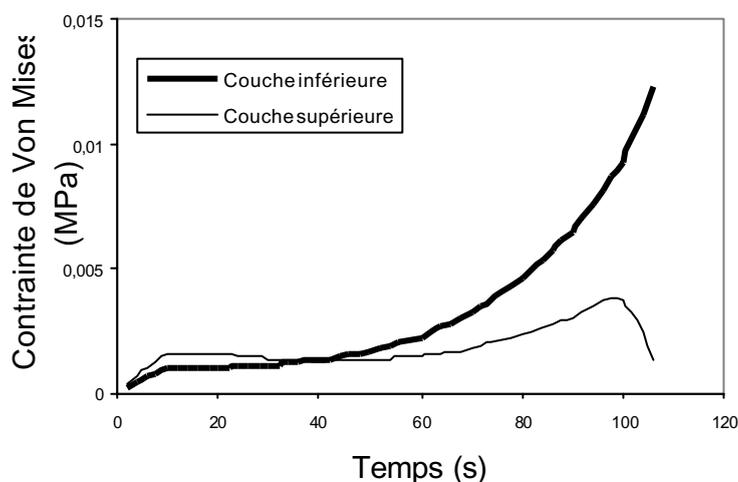


Figure 4.13 : Evolution de la contrainte de Von Mises pour deux couches différentes (montée en température de 6000°C/min)

Ceci s'explique par la hausse de leur température, qui fait chuter leur rigidité et augmente leur capacité à relaxer les contraintes, alors que les couches inférieures, plus froides, conservent une rigidité importante. Le déconfinement est donc gouverné par l'écoulement des couches situées vers la surface intérieure, et dont la température augmente moins vite.

#### 4.5.4 Simulation des deux mécanismes

La méthode qui a été appliquée pour la deuxième simulation concernant le premier mécanisme de déconfinement peut être généralisée à l'ensemble de la paroi du cylindre. Si le principe général est inchangé, il faut quand même procéder à plusieurs modifications.

Tout d'abord, le chargement considéré pour calculer les contraintes est cette fois-ci l'effort circonférentiel  $N_\theta$  (figure 4.14) sur la paroi. au lieu de l'effort de traction dans les fibres. Cette direction a été choisie puisque dans une enveloppe cylindrique soumise à une pression interne, la contrainte axiale est deux fois moins importante que la contrainte circonférentielle.

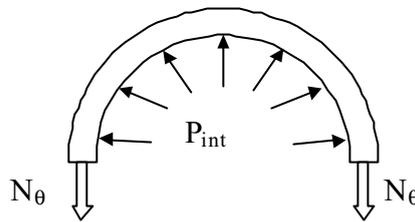


Figure 4.14 : Effort circonférentiel dans la paroi d'un cylindre

L'effort  $N_\theta$  étant exercé dans toute l'épaisseur de la paroi, il faudra cette fois-ci tenir compte non seulement de la partie fibreuse, mais aussi de la couche de PEHD et du liner d'aluminium dont le rôle mécanique est susceptible d'être non négligeable en particulier aux températures les plus hautes où, contrairement aux autres constituants, il conserve de bonnes propriétés.

Compte tenu de ces hypothèses, le déplacement radial  $\Delta R$  peut alors s'écrire :

$$\Delta R = \frac{N_\theta - \sum_i \sigma_j^e S_j}{n_{\text{faisceaux}} \times \sum_i \frac{E_i l \Delta e \sin \theta}{r_i} + \sum_k \frac{E_k L \Delta e}{r_k} + \frac{E_{\text{liner}} e_{\text{liner}} L}{r_{\text{liner}}}} \quad (4.17)$$

où  $n_{\text{faisceaux}}$  est le nombre de faisceaux de fibre sur la section du cylindre,

$L$  la longueur du cylindre,

$e_{\text{liner}}$  l'épaisseur du liner.

L'algorithme de calcul reste le même, mais le nombre de couches et leurs propriétés mécaniques doivent être complétées avec celles du PEHD et celle du liner métallique. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 4.3.

Vitesse de montée en température	100°C/min	1000°C/min	6000°C/min
Temps de déconfinement (s)	440	200	170
Pression interne (bar)	0,4	0,5	0,5

Tableau 4.3 : Résultats de la simulation des deux mécanismes

Ces résultats montrent que quelle que soit la vitesse de montée en température qui est imposée, le déconfinement se produit toujours avant que la pression interne n'atteigne un niveau susceptible d'entraîner une rupture violente assimilable à une explosion du réservoir. On constate même que le déconfinement aura lieu au moment où le liner métallique rompra. En effet, les tests d'éclatement réalisés sur ce dernier avaient montré qu'il résistait à une pression de 3 bars, qui est bien supérieure à la pression atteinte par le nitrométhane au moment de la fusion des fibres et du PEHD.

#### 4.5.5 Simulation du déconfinement par éléments finis

Le but de cette simulation est d'obtenir une évaluation du temps nécessaire au déconfinement en utilisant un modèle qui se rapproche le plus possible de la réalité. Elle doit donc prendre en compte à la fois la ruine du filet de renforcement et la rupture de la couche de PEHD. A la différence du calcul précédent, les deux contraintes, axiale et circonférentielle, ont été appliquées au domaine d'étude.

Le volume représentatif du multimatériaux pour ce calcul est différent de celui du paragraphe 4.5.3. En effet, comme le montre la figure 4.15, il est constitué d'une bande représentant le faisceau fibreux, et des deux parties d'alvéoles voisines. Ce domaine est maillé en trois dimensions de manière à représenter les différentes couches : PEHD et isolant pour les alvéoles, PEHD et fibres pour la bande centrale.

Le chargement appliqué à ce domaine est constitué de la pression exercée sur la face intérieure, et de la contrainte axiale exercée sur une des faces perpendiculaire à l'axe du cylindre. Sur les faces restantes, des conditions de symétrie sont imposées.

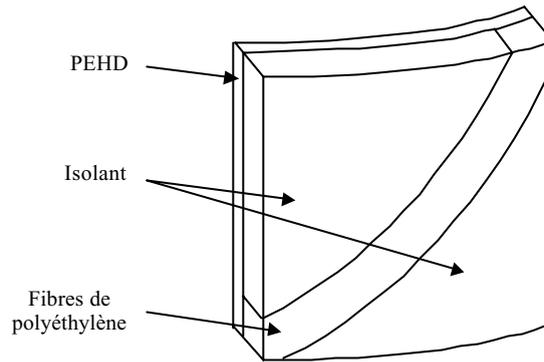


Figure 4.15 : Volume élémentaire représentatif du multimatériaux pour la simulation du déconfinement par éléments finis

Les lois de comportement attribuées aux fibres et au PEHD sont comme précédemment élastoplastiques, mais comprennent également les lois de fluage déterminées au chapitre 3. Cette simulation met donc en jeu tous les mécanismes pouvant entraîner le déconfinement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.4.

Vitesse de montée en température	100°C/min	1000°C/min	6000°C/min
Temps de déconfinement (s)	440	180	160
Pression interne (bar)	0,5	0,4	0,5

Tableau 4.4 : Résultats de la simulation des deux mécanismes par éléments finis

Ces calculs permettent de confirmer les valeurs trouvées lors de la première simulation, et valident donc les choix des paramètres dimensionnels puisque le déconfinement semble devoir se produire à des niveaux de pression interne suffisamment bas. De plus, il apparaît que le premier mécanisme à opérer est la ruine du filet de renforcement, qui intervient relativement tôt à cause de la vitesse de montée en température plus rapide que celle des couches inférieures. La couche de PEHD finit ensuite par rompre sous les effets conjugués de la pression et de la température.

Il faut enfin noter que, comme l'avait montré la simulation précédente, les niveaux de pression atteints au moment du déconfinement sont si bas que le mécanisme risque d'être retardé par la présence du liner, dont la résistance à la pression est de 3 bars.

## 4.6 Conclusion

Les paramètres dimensionnels du multimatériaux ont été définis pour qu'il puisse supporter la pression maximale de 30 bars. La taille des mailles du filet de renforcement a été déterminée pour que l'intérieur des alvéoles ne rompe pas, puis la largeur des faisceaux de fibres a été choisie suffisamment importante pour qu'il puisse supporter à lui seul la totalité des efforts dus à la pression.

La fonction principale du réservoir, c'est à dire le déconfinement, a ensuite été simulée pour vérifier le bon déroulement des deux mécanismes choisis. Ainsi, plusieurs calculs ont été effectués sur le seul renfort fibreux afin d'évaluer le premier mécanisme, puis sur la couche de PEHD pour le deuxième mécanisme. Ensuite, deux calculs, l'un analytique, l'autre par éléments finis, ont permis de prévoir la performance du multimatériaux dans la réalisation du déconfinement. Dans tous les cas envisagés, les calculs indiquent que la fonction sera satisfaite convenablement puisque les niveaux de pression atteints sont très faibles. De plus, il a été vérifié que les durées nécessaires à chacun des mécanismes pour opérer sont sensiblement les mêmes, ce qui montre qu'il n'existe pas un mécanisme prépondérant sur l'autre.

Le multimatériaux étant complètement défini, il reste après ces simulations à passer à la fabrication d'un prototype en vue d'une vérification expérimentale de son comportement.



# Chapitre 5 : Validation expérimentale du multimatériaux

La méthode de conception qui a été employée pour cette étude impose la réalisation d'un prototype en vue de la vérification de la faisabilité du multimatériaux, de sa réponse au cahier des charges et de la réalisation d'éventuels ajustements. Il a donc fallu, après avoir effectué toutes les simulations nécessaires à l'évaluation des mécanismes proposés, aborder une vérification expérimentale.

La fabrication du multimatériaux puis les essais qui ont été pratiqués sont présentés dans ce chapitre.

## 5.1 Conception de l'essai

La conception d'un multimatériaux implique la vérification expérimentale de ses propriétés car les simulations numériques ne sauraient suffire à valider les choix effectués. Un ou plusieurs essais spécifiques visant à reproduire les fonctions que doit assurer le multimatériaux doivent donc être mis en place.

Dans le cas présent, le cahier des charges, établi en collaboration avec le CEA, avait pour but de rester le plus général possible pour ne pas concentrer l'étude sur des problèmes particuliers propre à une application. Les essais à prévoir avaient donc pour but de vérifier que le filet de renforcement était capable de supporter une pression interne de 30 bars, que les alvéoles ne seraient pas extrudées lors dans ces mêmes conditions, et enfin, que la fonction de déconfinement pouvait être remplie grâce aux mécanismes décrits auparavant.

Alors qu'au départ, le cahier des charges n'imposait pas de forme particulière, la conception du multimatériaux s'est naturellement dirigée en vue d'essais vers des formes classiques de réservoir, pour finalement privilégier la forme cylindrique qui offre plus de facilités pour la mise en œuvre qu'une forme sphérique.

Toutefois, ce choix découle seulement d'une réflexion préalable sur le type d'essai devant conclure ce travail, et ne concerne aucune des applications du CEA. C'est donc une démarche intuitive qui a conduit à rajouter cette condition dans le cahier des charges.

Même si cette forme cylindrique a été choisie et s'est imposée très tôt dans le déroulement de la conception parce qu'implicitement les conditions d'essai étaient envisagées, les étapes de conception qui ont suivi ne dépendent pas de la forme du réservoir, et ne doivent donc pas être remises en cause. En effet, bien que les résultats obtenus seraient sans doute différents, les méthodes appliquées et les principes proposés sont applicables à d'autres géométries.

Cette réflexion conduit donc à penser que la conception d'un essai de vérification doit avoir lieu dès les premières phases de la démarche, au moins pour définir des points fondamentaux tels que la géométrie de l'éprouvette; le procédé de fabrication du multimatériaux en dépend.

## **5.2 Réalisation d'un prototype**

Pour pouvoir fabriquer ce prototype, il a fallu dans un premier temps, au moment même de la conception du multimatériaux, proposer les grandes lignes d'un procédé de mise en œuvre. Ce n'est en revanche qu'une fois fixés les paramètres dimensionnels de ce multimatériaux qu'un procédé a pu être vraiment défini. Il faut néanmoins souligner que ce procédé est adapté à la géométrie du prototype sur lequel seront effectuées les premières validations, mais ne pourrait constituer un procédé de fabrication satisfaisant en vue d'une application industrielle que si son coût pouvait être réduit.

### **5.2.1 Conditions de mise en oeuvre**

La fabrication du prototype devait s'effectuer en trois phases principales : le dépôt de la sous couche de PEHD sur l'isolant, l'usinage de rainures hélicoïdales, puis la réalisation du filet de renforcement par bobinage.

Les pressions utilisées habituellement pour l'injection du PEHD étant de l'ordre de 200 bars, l'utilisation d'une méthode classique était ici impossible puisque ce dépôt devait se faire à l'intérieur de l'isolant thermique dont les propriétés mécaniques sont modestes. Le caractère endommageable de ce matériau obligeait donc à renoncer à de trop fortes pressions d'injection. De plus, même si cette opération devait aussi fournir un accrochage entre le PEHD et l'isolant, son imprégnation en profondeur par le PEHD devait être évitée car elle aurait pour conséquence de lui faire perdre ses propriétés d'isolation qui proviennent de son

fort taux de porosité. On se propose donc de réaliser ce dépôt par aspiration, avec une dépression de 900 mbar.

La couche de PEHD à déposer étant d'une épaisseur de 3 mm, il a fallu utiliser un noyau, concentrique avec l'isolant, pour constituer la deuxième paroi du moule. Le rôle du noyau était de guider le PEHD pendant l'aspiration, mais aussi de maintenir le liner en place et éviter qu'il ne se déforme pendant cette opération. Comme cela a été noté au cours de la phase de conception au chapitre 2, le noyau a donc été réalisé en sable en utilisant un liant soluble à l'eau chaude (alcool polyvinylique).

Après ce dépôt de PEHD, on disposait d'un cylindre constitué d'un noyau en sable autour duquel se trouvait le liner, la sous couche de PEHD et l'isolant sur la surface extérieure. L'étape suivante de la fabrication était l'usinage de rainures hélicoïdales servant à délimiter l'espace réservé au filet de renforcement.

Enfin, la dernière phase concernait la réalisation du filet de renforcement par bobinage. Cette opération imposait des contraintes de conception de l'outillage. En effet, elle exigeait que le cylindre soit traversé par un axe servant à l'entraînement en rotation de la pièce au cours du bobinage. De plus, le bobinage étant effectué de manière continue, la mèche de fibre devait pouvoir tourner une fois arrivée à une extrémité pour repartir sur un autre hélicoïde. Le bobinage a donc exigé la définition d'extrémités particulièrement adaptées.

## 5.2.2 Conception de l'outillage

Le premier outillage a servi au moulage du noyau en sable. Il se présente sous la forme d'un cylindre permettant le passage et le centrage de l'axe (figure 5.1).

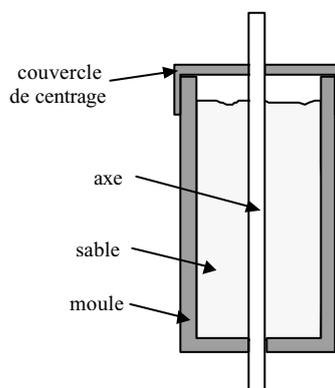


Figure 5.1 : Montage de fabrication du noyau

Ensuite, pour le dépôt de PEHD, la réalisation d'une enceinte étanche était nécessaire de sorte que l'aspiration puisse se faire par la partie supérieure, puis au travers de l'isolant.

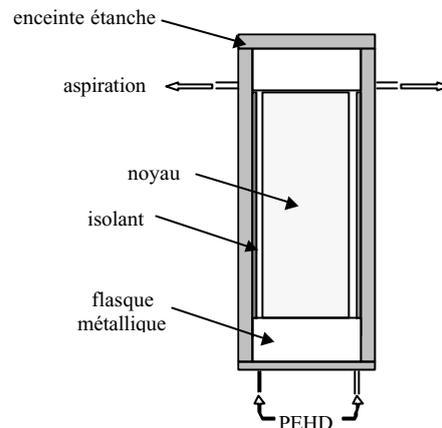


Figure 5.2 : Montage utilisé pour la réalisation du dépôt de PEHD

Comme cela a été précisé au paragraphe précédent, la conception des extrémités du réservoir cylindrique a fait l'objet d'une étude particulière. L'importance de cette partie du cylindre était déjà apparue lors du dimensionnement puisque l'effort axial dans la paroi était dû à la présence de fonds sur le cylindre. Même si elle ne représente que la moitié de l'effort circonférentiel, cette composante n'est pas négligeable puisqu'elle a contribué à déterminer l'angle du bobinage par la théorie du filet. Les fonctions attendues de ces extrémités sont donc de permettre, pendant la fabrication, le retour de la mèche de fibre en bout d'hélicoïde, puis, au moment d'effectuer les essais de validation, de transmettre l'effort axial au réseau fibreux, assurer l'étanchéité de l'ensemble et permettre son raccordement au système de mise en pression.

Pour la première partie, il a semblé que l'utilisation de roues à picots (figure 5.3) était la solution la plus simple pour assurer aux fibres une bonne trajectoire tout en conservant des ouvertures assez larges pour la mise sous pression, ce qui ne serait pas le cas avec des extrémités hémisphériques. L'utilisation de ces mêmes pièces au moment de l'aspiration du PEHD permettrait d'obtenir une liaison entre cette sous couche et les fonds, ce qui reviendrait par la suite à soumettre l'ensemble de la paroi à cet effort. On a donc procédé à une minimisation du nombre de pièces à concevoir en décidant d'utiliser certaines parties du montage de mise en œuvre pour les essais.

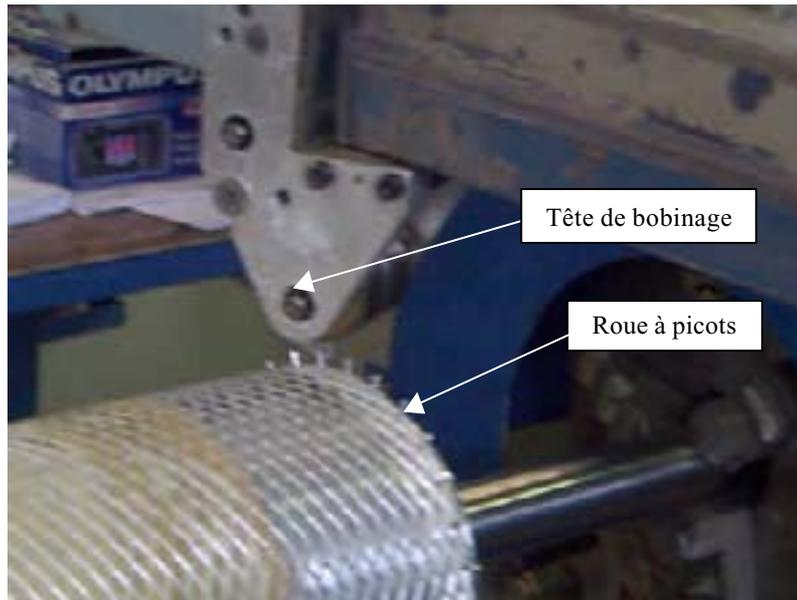


Figure 5.3 : Roue à picots

Ces pièces situées aux extrémités ayant aussi pour fonction d'assurer l'étanchéité de l'ensemble et de pouvoir être raccordées, la géométrie classique d'une roue à picots a du être modifiée pour pouvoir procéder au collage du liner métallique sur la surface intérieure, au vidage du noyau en sable, et à l'adaptation de bouchons ou de raccords.

L'ensemble des pièces conçues pour la mise en oeuvre est représenté en annexe 4, sous la forme des montages utilisés lors de chaque phase.

### 5.2.3 Examen critique de la réalisation et propositions d'améliorations

La mise en pratique de la procédure décrite en annexe 5 a mis en évidence des problèmes qui, sans être rédhibitoires, devraient être corrigés en vue d'une amélioration. Tout d'abord, lors de la phase d'aspiration, des fissures sont apparues dans l'isolant. La dépression créée brusquement au départ par l'ouverture d'une vanne, et le temps de mise à l'équilibre assez important peuvent expliquer cet endommagement. Il conviendrait donc de prévoir un système permettant de faire le vide plus progressivement dans le moule pour que la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de l'isolant n'atteigne pas des valeurs susceptibles d'entraîner une fissuration.

Une conséquence de cette rupture est que le PEHD, qui aurait normalement du rester accroché sur la face intérieure de la préforme, s'est retrouvé localement en contact et a adhéré avec le cylindre extérieur en aluminium. Le démoulage n'a donc pas pu se passer de la

manière prévue, c'est à dire en faisant coulisser ce cylindre sur l'ensemble. La partie extérieure du moule a donc été usinée, et ne sera donc pas réutilisable.

Un des défauts du montage qui a été conçu est de ne pas permettre le contrôle du niveau de progression du PEHD dans le moule pendant la phase d'aspiration. Ainsi, la durée de celle-ci a été fixée sur l'expérience acquise lors de la fabrication des éprouvettes de PEHD et sur des essais de faisabilité, et a semble-t-il été surestimée, puisque le PEHD a légèrement imprégné l'isolant. Cela a eu pour conséquence de diminuer les propriétés d'isolation thermique, mais a aussi notablement renforcé les propriétés mécaniques de cet isolant susceptible d'entraver le déconfinement. Toutefois, l'imprégnation n'étant pas complète, une fragilisation de la surface externe a été constatée, conduisant parfois à quelques arrachements de l'isolant lors de l'usinage. Comme ces aspérités étaient assez peu répandues par rapport à la surface totale de l'enveloppe et comme leur amplitude ne dépassait pas 1 mm, ce problème n'a pas eu de conséquence quant au guidage des fibres dans les rainures.

## **5.3 Validation expérimentale de la conception**

Une fois le prototype fabriqué, il a fallu le tester afin de vérifier que le multimatériau conçu répondait bien au cahier des charges de départ. Ces essais consistaient donc en une vérification de la résistance du multimatériau à une pression interne de 30 bars dans son domaine de températures d'utilisation.

### **5.3.1 Dispositif expérimental**

Pour réaliser l'essai de mise sous pression à 30 bars, le réservoir a connu quelques modifications. Tout d'abord, le collage du liner sur le flasque métallique supérieur n'ayant pas supporté la brutale dépression dans la zone du moulage par aspiration du PEHD, une vessie en caoutchouc a été utilisée pour introduire le liquide dans le réservoir. Afin d'assurer le raccordement avec le système de mise en pression, un bouchon conique (figure 5.4) permettant le serrage de la vessie a été conçu et réalisé.

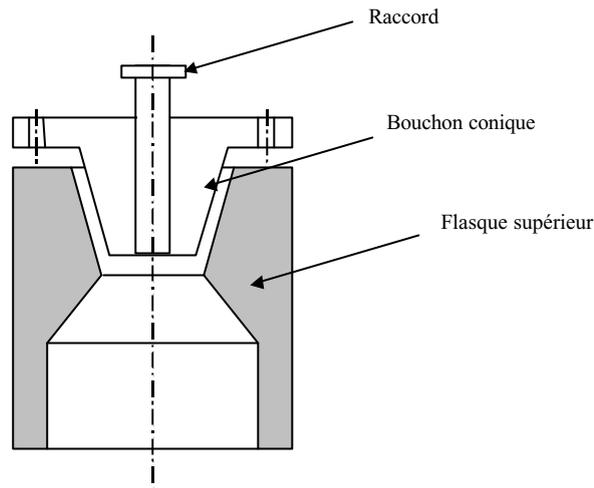


Figure 5.4 : Système de fixation et raccordement de la vessie

Les aspérités se trouvant sur la surface intérieure du cylindre risquant de crever la vessie durant l'essai, une plaque de téflon roulée de 2 mm d'épaisseur a été glissée dans le réservoir et positionnée contre la paroi. Elle permet ainsi de gommer les irrégularités du dépôt de polyéthylène. De plus, les flasques n'ayant pas été prévus pour recevoir un montage de ce type, ils présentaient des angles trop vifs. Une résine silicone a donc été appliquée pour les adoucir et les rendre moins tranchants.

La mise en pression de l'ensemble a été effectuée à l'aide d'une pompe manuelle équipée d'un manomètre. La mesure du déplacement radial s'étant avérée peu précise et surtout peu représentative de la déformation du cylindre, elle n'a pas été effectuée pour le test à 30 bars. En effet, vu la déformation non uniforme que subit le réservoir, le placement arbitraire d'un capteur de déplacement sur un point précis n'était pas souhaitable.

### 5.3.2 Essai de mise sous pression

La mise sous pression est effectuée avec de l'eau de façon à éviter une détente trop importante en cas de rupture brutale du réservoir, et le plus lentement possible afin d'éviter des à-coups. A partir de 15 bars, on a constaté un endommagement sur la surface extérieure qui se traduit par le décrochement de plusieurs alvéoles. Ce phénomène étant localisé, la montée en pression est poursuivie et menée jusqu'à 30 bars sans provoquer de rupture globale de la paroi.

Le fait que le réservoir ait pu supporter cette pression sans rompre valide le dimensionnement du filet de renforcement. En effet, ce dernier a comme prévu repris la plus grande partie des efforts dus à la pression.

Toutefois, des réserves peuvent être émises sur les conclusions à tirer concernant le comportement des alvéoles. En effet, les ruptures qui ont été constatées ne peuvent être considérées comme traduisant le comportement de ces parties du multimatériaux puisqu'elles se sont produites en petit nombre dans une zone proche des flasques métalliques, donc probablement soumise à des effets de bord importants. De plus, il apparaît que ces morceaux d'isolant étaient faiblement accrochés à cause d'une absence de polyéthylène dans la couche inférieure. Il semble donc que, plutôt qu'une erreur de conception, la mauvaise qualité du dépôt de PEHD soit à l'origine de ces ruptures locales.

En ce qui concerne la zone "utile" du prototype, c'est à dire la partie centrale, aucune des alvéoles n'a semblé endommagée. Il serait donc intéressant de pratiquer des essais de mise sous pression avec un montage qui permettrait de gommer toutes les aspérités de la paroi, mais sans modifier notablement la raideur locale des alvéoles comme le fait la plaque de téflon.

## **5.4 Conclusion**

La fabrication du réservoir a été menée à bien suivant le procédé défini lors de la conception du multimatériaux. Elle a toutefois mis en évidence la nécessité de pratiquer des améliorations sur certaines opérations, particulièrement l'injection du PEHD. En effet, cette opération a été à l'origine d'un endommagement de l'isolant, entraînant des difficultés lors du démoulage de la pièce. De plus, la mauvaise qualité de ce dépôt a ensuite été la cause de plusieurs modifications dans le montage d'essai.

Ces défauts peuvent être supprimés par la mise en place de moyens de contrôle de l'avancée de ce dépôt en cours de réalisation, et une mise en dépression moins brutale pour éviter l'endommagement de l'isolant.

L'essai de montée en pression à 30 bars a été pratiqué, et a permis de valider le dimensionnement du filet de renforcement. Toutefois, les modifications apportées ne permettent pas de tirer de conclusions définitives sur la tenue de la couche de PEHD au centre des alvéoles.

Il convient enfin de garder à l'esprit que le procédé dont la mise en œuvre peut être améliorée reste associée à la fabrication d'un prototype d'essai et que la réalisation de tout autre structure avec ce multimatériaux pourrait faire appel à des procédés très différents et moins coûteux.



# Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail était de contribuer à la mise au point d'une méthode de conception de multimatériaux en suivant deux idées directrices qui étaient (1) d'adapter certains principes des méthodes existantes, (2) de mener à bien une étude de cas pour mieux se confronter aux problèmes concrets posés par ce type de conception.

L'analyse des méthodes de conception les plus répandues et des méthodes de sélection de matériaux a montré en quoi elles n'étaient pas adaptées à la conception de multimatériaux. Toutefois, il a été possible d'adapter plusieurs principes, tels que la rédaction rigoureuse du cahier des charges fonctionnel, son analyse, le traitement des fonctions indépendamment les unes des autres dans un premier temps et ensuite leur regroupement.

L'étude de la conception d'un multimatériaux pour un réservoir a permis de mettre ces principes en pratique. Dans un premier temps, une méthode de sélection de matériaux a été employée grâce au logiciel CES. Devant l'absence de solution donnée par cette voie, un cahier des charges du multimatériaux a été proposé, les mécanismes permettant d'y répondre au mieux ont été choisis parmi diverses solutions envisageables. Une fois l'architecture du multimatériaux définie, les constituants ont été choisis grâce aux cahiers des charge rédigés pour chacun d'entre eux dans le but de pouvoir faire fonctionner le ou les mécanismes proposés. Un multimatériaux constitué d'une sous couche de PEHD et d'une couche extérieure d'isolant céramique, renforcée par un filet de fibres de polyéthylène a été conçu. En plus de ces matériaux, un liner en aluminium a été rajouté pour assurer l'étanchéité et la compatibilité avec le nitrométhane.

Le résultat obtenu montre donc la grande variété des attendus du matériau puisqu'ils ont conduit à la conception d'un multimatériaux qui combine les trois grandes classes de matériaux : les polymères (PEHD et fibres), les céramiques (isolant) et les métaux (liner aluminium). Cette étude a aussi montré la nécessité d'intégrer la mise en œuvre dès les premières étapes de la conception, sans obligatoirement fixer le niveau de tous les paramètres, mais au moins en prévoyant les différentes phases du procédé.

Une phase de caractérisation des constituants a été menée pour décrire précisément leur comportement dans les conditions d'utilisation souhaitées. En effet, il est assez peu fréquent de choisir un matériau pour une application en raison de la perte de ses qualités mécaniques en cas d'élévation de température. Les comportements des différents constituants,

particulièrement des fibres de polyéthylène et du PEHD, ont donc été étudiés sur un domaine allant de la température ambiante jusqu'à la température de fusion de façon à pouvoir simuler les performances du multimatériaux.

De plus, il a été montré que le liner en aluminium risquait de jouer un rôle non négligeable lors du déconfinement étant donné sa bonne résistance à une pression interne. Enfin, une valeur maximale à donner à la tension de la mèche de fibres lors du bobinage a été déterminée avec pour critère de ne pas dégrader l'isolant en l'écrasant.

Ce travail de caractérisation était nécessaire à la définition précise des paramètres dimensionnels du multimatériaux et à la simulation de son comportement. Dans un premier temps, les paramètres ont été fixés à des valeurs qui permettent d'assurer que la structure d'essai que constitue le réservoir satisfasse la contrainte la plus restrictive qui est la pression de 30 bars. Ensuite, le comportement du multimatériaux dans la réalisation des fonctions, en particulier du déconfinement, a été simulé. On a ainsi pu observer que les deux mécanismes devaient, suivant les prévisions, se produire à des niveaux de pression suffisamment faibles pour éviter toute détonation.

La dernière étape de cette étude de conception résidait dans la fabrication du multimatériaux dans le cadre de la réalisation de la structure d'essai de validation et la vérification expérimentale des fonctions qui sont attendues de lui. Tout d'abord, sa mise en œuvre a nécessité la conception d'outillages spécifiques pour chaque phase du procédé, puis des ajustements de paramètres concernant le noyau en sable, l'usinage ou le bobinage.

La fabrication du prototype a permis de mettre en valeur la nécessité d'améliorer certaines phases du procédé de fabrication, en particulier la réalisation du dépôt de PEHD. La mauvaise qualité de ce dernier a de plus été la cause de difficultés d'interprétations sur l'essai de mise sous pression à 30 bars. Cet essai a tout de même pu être mené à bien et a confirmé le bon dimensionnement du filet de renforcement.

L'établissement du cahier des charges de ce multimatériaux suscite des commentaires et des réflexions. La thèse ayant un caractère méthodologique, le cahier des charges du multimatériaux a été élaboré en concertation avec le CEA pour permettre à l'étude de conserver un aspect général, et ne pas conduire à se focaliser sur des problèmes trop spécifiques à une application. Il a donc fallu s'affranchir de certains approfondissements sur des fonctions telles que la résistance à une chute de 5 mètres, et ne pas se pencher sur des singularités telles que les effets de bords sur la structure d'essai. Toutefois, le fait d'imposer une forme cylindrique dans le cahier des charges du client tend à le rapprocher d'un cahier des

charges de structure plus que de matériau. Pour comprendre les raisons d'une telle formulation, il faut se pencher sur les raisonnements effectués au début de l'étude. La mise au point d'un essai de validation du comportement du multimatériaux est un point essentiel du travail qui a lui aussi soulevé quelques interrogations. Ainsi, une réflexion implicite sur les moyens de fabriquer et tester une structure sous pression a amené très tôt dans cette étude à se tourner vers des formes classiques telles que la sphère ou le cylindre. Cette astreinte a même été incluse dans le cahier des charges du matériau, pouvant conduire à une confusion entre la structure réelle d'application, le prototype de validation, et le multimatériaux lui même. Dans le cas présent, il a été nécessaire de faire cette distinction au moment de la conception de l'essai, mais le fait d'imposer une géométrie n'a remis en question ni la conception ni les simulations numériques effectuées.

La phase de réalisation d'un montage de validation pousse à introduire dans cette étude le problème du coût dont il n'a pas été question ici. En vue d'une application industrielle, il paraîtrait en effet indispensable de prendre en compte ce facteur par le biais d'une méthode de type analyse de la valeur. Des coefficients de pondération permettraient donc d'évaluer, suite au choix de ce multimatériaux, l'intérêt du gain de performance de la structure par rapport au surcoût d'une telle solution.

Un intérêt essentiel de ce travail est d'avoir montré le caractère pluridisciplinaire de la conception de multimatériaux. En effet, cette étude a demandé la réunion de compétences dans des domaines variés tels que la conception, la fabrication, la modélisation ou les méthodes numériques. Devant un tel éventail, il semble impossible qu'une personne unique puisse avoir les compétences nécessaires pour mener à bien le projet. Le caractère méthodologique de cette thèse a donc conduit à développer un savoir faire en matière de conception de multimatériaux plutôt que de développer des connaissances sur un sujet précis. Ainsi, il a fallu définir une approche permettant de mieux utiliser les compétences disponibles dans tous les domaines cités précédemment. Tous ces aspects devant souvent être abordés simultanément, et les interactions étant nombreuses, le concepteur a ici un rôle de coordinateur très important, ainsi qu'un rôle décisionnaire.

Afin de pouvoir effectuer des choix et donner des orientations à la conception, les décisions doivent être prises après avoir collecté le maximum d'informations auprès de chacun des intervenants. Le concepteur doit donc dans cette situation prendre le recul nécessaire pour prévoir les répercussions de son choix sur les différentes facettes de l'étude. La réunion de toutes ces activités au sein d'une même étude impose d'attacher une grande importance à la communication entre les personnes travaillant dans chacun des domaines concernés. A ce

titre, la conception de multimatériaux se rapproche au niveau relationnel des procédures mises en place par un chef de projet.

D'un point de vue méthodologique, ce travail a démontré la difficulté de la conception de multimatériaux, en particulier lorsqu'il s'agit de rechercher des mécanismes de combinaison des matériaux. En effet, le concepteur se retrouve confronté à ce stade de l'étude à un cahier des charges exprimant un besoin en terme de propriétés globales du multimatériaux auquel il doit répondre en terme de mécanismes. A la différence de la conception d'un produit ou de la sélection d'un matériau, il n'existe pas en ce domaine de base de données qui fournirait une liste de solutions envisageables. Ce vide peut certes s'expliquer par le caractère récent de l'intérêt pour ces matériaux, mais aussi par la difficulté d'en faire une liste exhaustive tellement les possibilités sont étendues. Il est tout de même possible d'imaginer des outils capables d'orienter la conception, mais sans donner directement une solution.

## **ANNEXES**



# ANNEXE 1

## Cahier des charges fonctionnel

	Critère	Niveau
<b>Fonctions</b>		
Contenir le liquide et sa phase gazeuse	Volume	5 litres de nitrométhane, la phase liquide étant supposée en permanence en équilibre avec la phase gazeuse.
	Taux de fuite (liquide et gaz)	0
	Etre compatible avec le nitrométhane	Pas de diffusion du liquide dans le matériau et réciproquement.
Résister à la pression exceptionnelle d'utilisation	Pression d'utilisation	20 bars pendant 720 s, tests à 30 bars
Rester étanche après une chute	Hauteur de chute	5 m
Ne pas exploser sous un acte de malveillance	Quantité de mouvement du projectile	Eclat 4 g à 1500 m/s
Ne pas exploser sous une agression thermique	Température de déconfinement	150°C
Tenir compte des conditions extérieures	Température	-30°C < T < 50°C pendant 99,8% du temps
Résister à la pression générée par la phase vapeur	Pression de stockage	Pression due à 50°C
Isoler thermiquement le produit	Température atteinte dans le liquide	-20°C minimum pour une exposition à -70°C pendant 8 heures en partant de -10°C.
<b>Contraintes</b>		
Encombrement	Epaisseur	La plus faible possible et en tout cas inférieure à 10 mm.
Pouvoir être fabriqué en série	Nombre d'exemplaires	100
Masse	Masse	La plus faible possible et en tout cas inférieure à 5 kg.
Coût	Prix de la maquette	Le plus faible possible.



## ANNEXE 2

### Isolation thermique : Calcul de la conductivité thermique maximale

On considère la structure axisymétrique représentée à la figure A2.1.

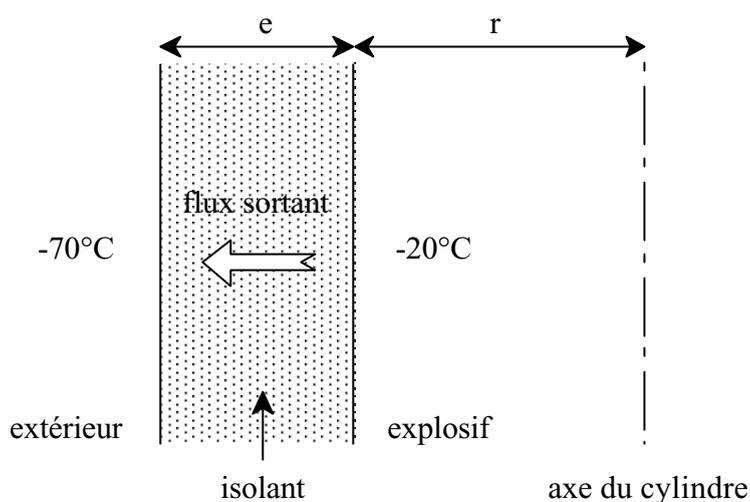


Figure A2.1 : Représentation du domaine d'étude

#### Flux de chaleur minimal :

La température de l'explosif, initialement de  $-10^{\circ}\text{C}$ , va décroître au cours du temps. Le cahier des charges stipule toutefois qu'elle ne doit pas descendre en dessous de  $-20^{\circ}\text{C}$ . Le flux de chaleur étant proportionnel au gradient de température, la valeur minimale sera trouvée pour une température dans l'explosif de  $-20^{\circ}\text{C}$ . On obtient donc :

$$\phi_{\text{sortant}} = \lambda \frac{(\Delta T)_{\text{ext}}}{e} \quad \text{avec } \lambda = \text{conductivité thermique de l'isolant}$$

$(\Delta T)_{\text{ext}}$  = différence de température entre l'extérieur et l'explosif

Quantité de chaleur perdue :

Le flux calculé doit être considéré sur toute la surface du cylindre, et sur une durée totale de 8 heures pour obtenir la quantité de chaleur minimale perdue par l'explosif :

$$Q_{\text{totale}} = \lambda \frac{(\Delta T)_{\text{ext}}}{e} \times 2\pi \times r_{\text{moy}} \times h \times (\Delta t) \quad \text{avec } h = \text{hauteur du cylindre}$$

$$r_{\text{moy}} = r + e/2$$

Quantité de chaleur nécessaire pour abaisser la température de l'explosif de 10°C :

$$Q_{\text{exp}} = (\rho C)_{\text{exp}} (\Delta T)_{\text{isol}} \times \pi \times r^2 \times h \quad \text{avec } (\Delta T)_{\text{isol}} = \text{variation de température de l'explosif (ici } 10^\circ\text{C)}$$

En écrivant l'égalité de ces deux grandeurs, on peut tirer la conductivité thermique maximale admissible pour satisfaire le cahier des charges :

$$\lambda = \frac{(\rho C)_{\text{exp}} e r (\Delta T)_{\text{isol}}}{2(\Delta t)(\Delta T)_{\text{ext}}} = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ W / mK}$$

Cette conductivité ne semble pas pouvoir être atteinte puisque celles des isolants les plus performants se situent plutôt autour de 0,02 W/mK.

## ANNEXE 3

### Cinétique de déconfinement

Le processus de déconfinement doit permettre d'éviter l'explosion du réservoir. Il est donc capital de connaître les vitesses de montée en température et en pression du nitrométhane, et d'estimer la vitesse de déconfinement.

Dans un premier temps, on considère que l'explosif est à l'équilibre entre la phase liquide et la phase vapeur dès le départ. La pression de vapeur saturante de ce composé est donnée par une règle à quatre paramètres (A, B, C, D) appelée loi de Wagner, dont la forme est la suivante :

$$\ln\left(\frac{p^s}{p_c}\right) = \frac{T_c}{T} \left(AX + BX^{3/2} + CX^3 + DX^6\right)$$

$$\text{avec } X = 1 - \frac{T}{T_c} \text{ et } P^s : \text{pression de saturation}$$

$p_c$ ,  $T_c$ : pression et température critiques

On obtient la courbe de vaporisation du nitrométhane (figure A3-1), sur la plage de température de l'application.

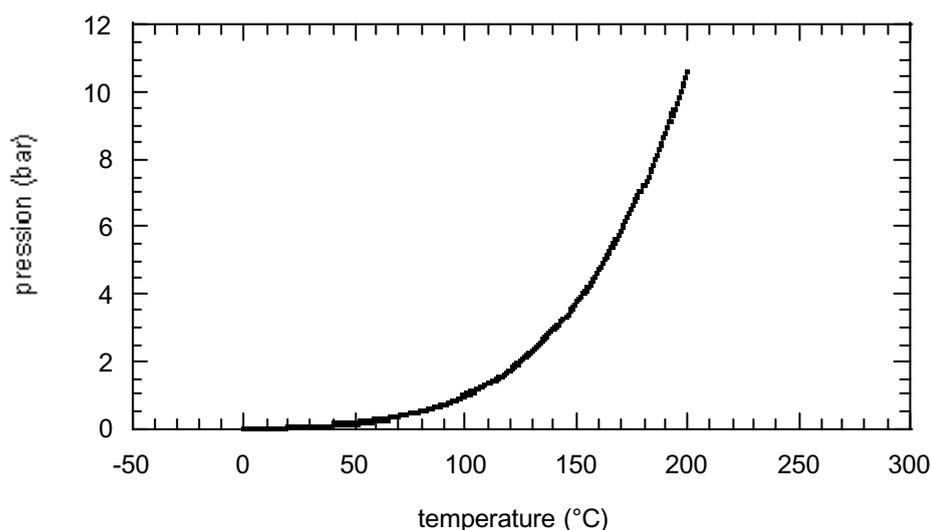


Figure A3-1 : Courbe de vaporisation du nitrométhane

Le premier renseignement que l'on peut tirer de cette courbe est que la pression interne ne fournira pas un moteur de déconfinement très important. En effet, on voit qu'à environ 175°C, la pression interne ne sera que de l'ordre de 7 bars. La chute de résistance mécanique des matériaux devra donc être assez importante lors de cette montée en température.

La cinétique de déconfinement doit maintenant être précisée. La structure étudiée pour ce calcul (figure A3-2) représente une coupe dans l'épaisseur du cylindre, avec une couche de polyéthylène en surface de 3 mm, une couche d'isolant de 7 mm, et 70 mm de nitrométhane. La température au départ est de 0°C (uniforme), puis on applique un échelon de 800°C à l'extérieur.

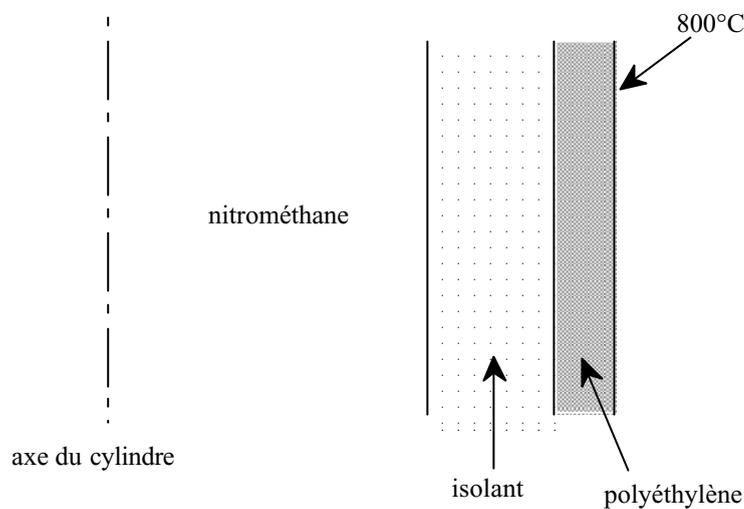


Figure A3-2 : Coupe longitudinale du cylindre

Plusieurs possibilités se présentent pour calculer la vitesse de montée en pression de l'explosif, puisque l'on peut considérer soit que les mécanismes de convection vont uniformiser la température dans le liquide, soit faire un calcul en ne prenant en compte que les transferts par conduction. Dans le premier cas (figure A3-3), le déconfinement pourra se faire très lentement (de 15 à 20 minutes).

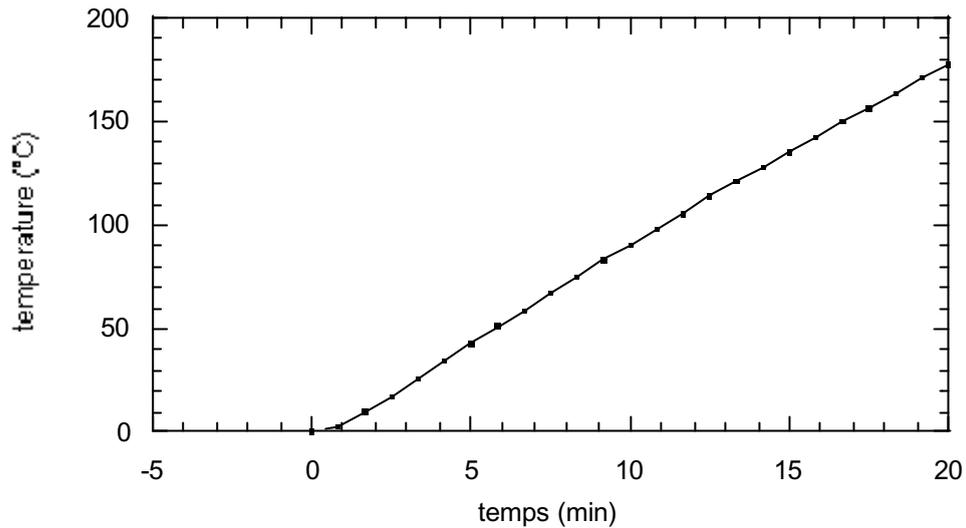


Figure A3-3 : Montée en température du nitrométhane avec convection

Dans le deuxième cas (figure A3-4), la répartition de température dans le liquide n'est plus uniforme puisque seuls des échanges par conduction se produisent. La valeur relevée sera donc la température à la paroi, l'explosif ne devant atteindre 150°C en aucun point.

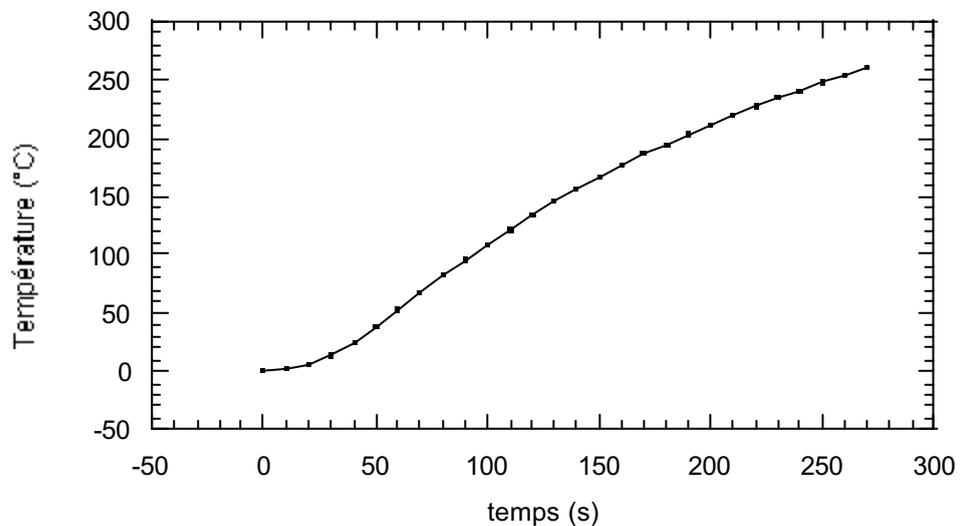


Figure A3-4 : Montée en température du nitrométhane sans convection

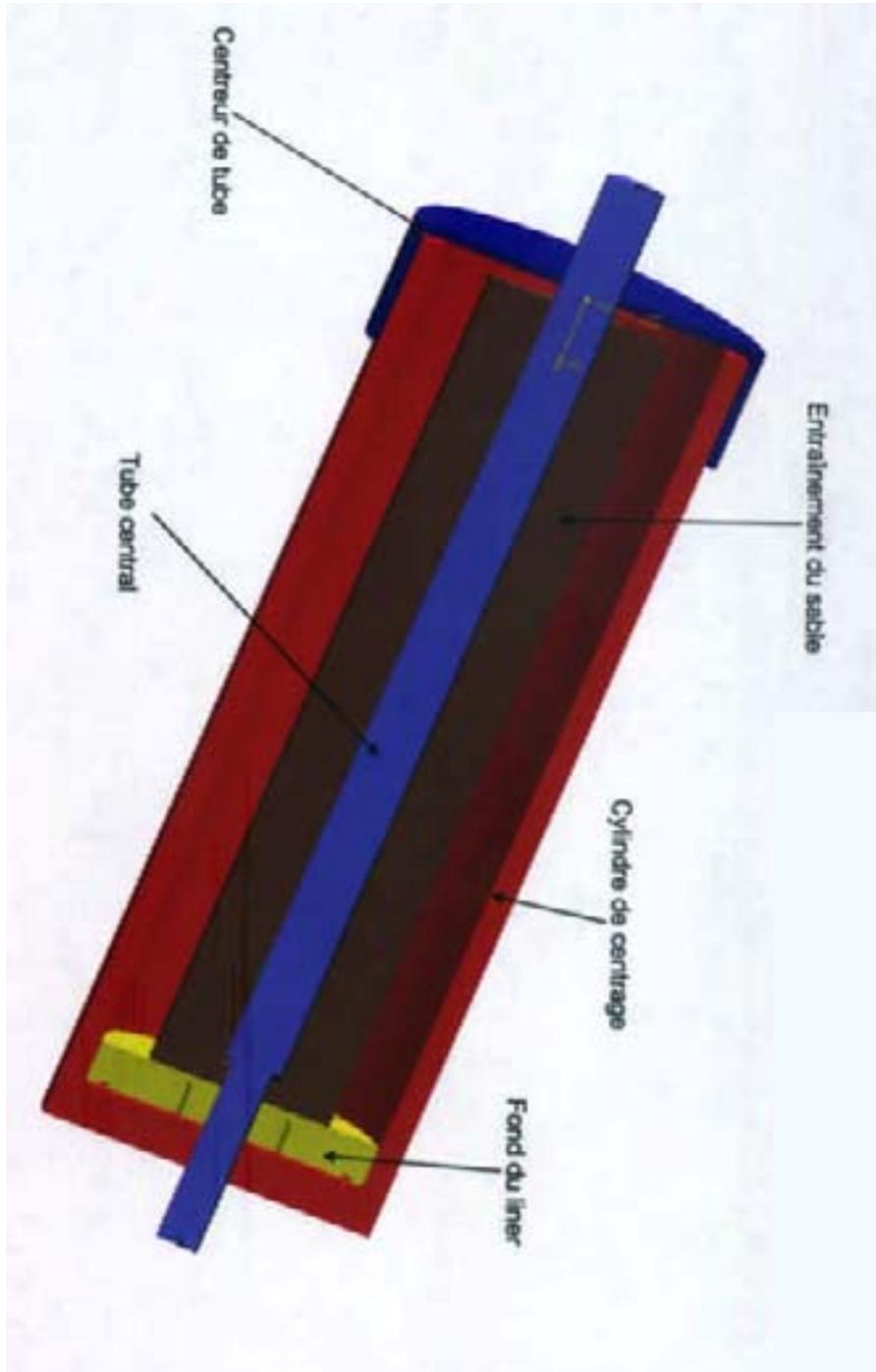
La montée en pression se fait plus rapidement qu'avec les hypothèses précédentes, mais reste encore de l'ordre de 3 minutes.



## ANNEXE 4a

### Montage de mise en œuvre du multimatériaux

Fabrication du noyau

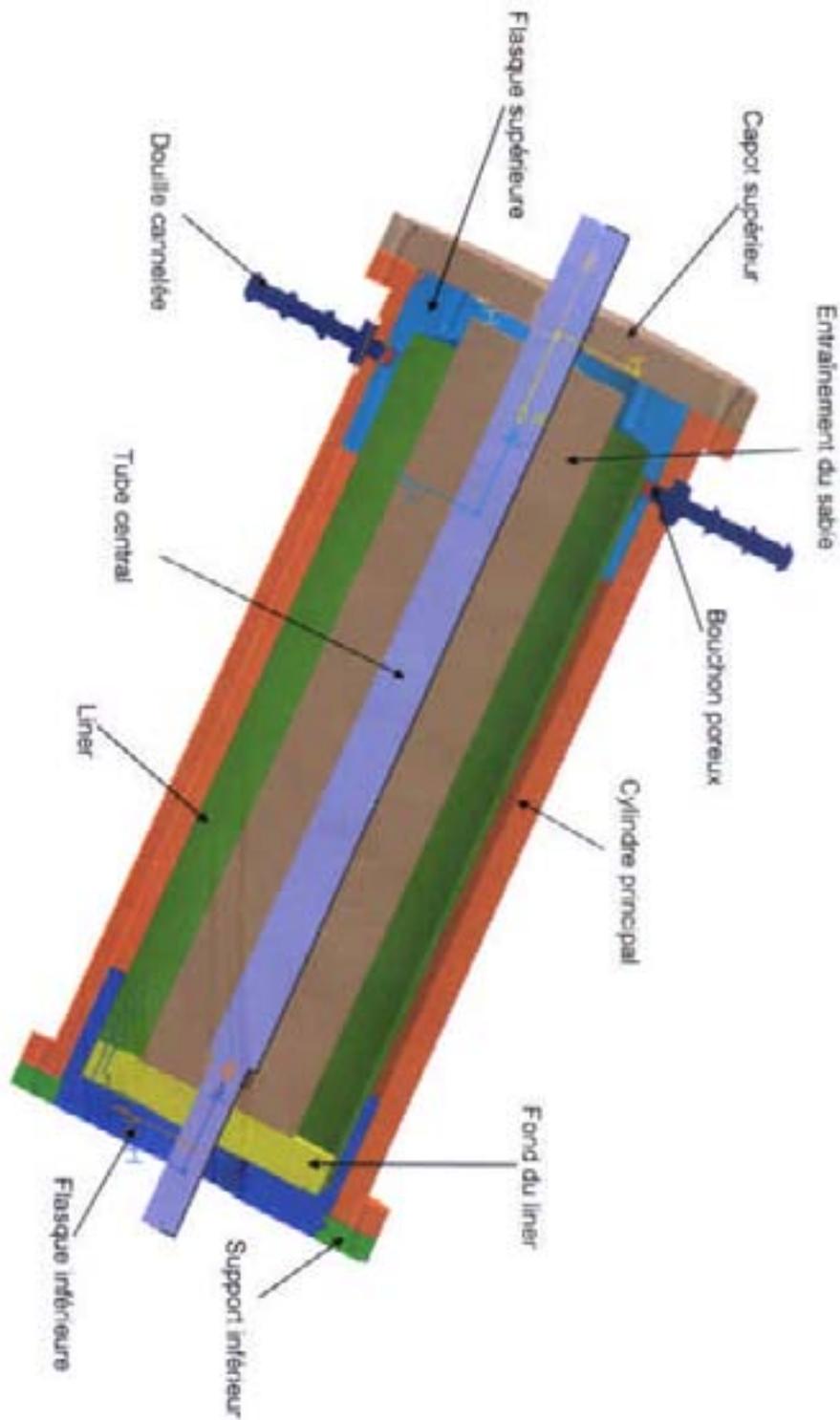




## ANNEXE 4b

### Montage de mise en œuvre du multimatériaux

Moulage du PEHD

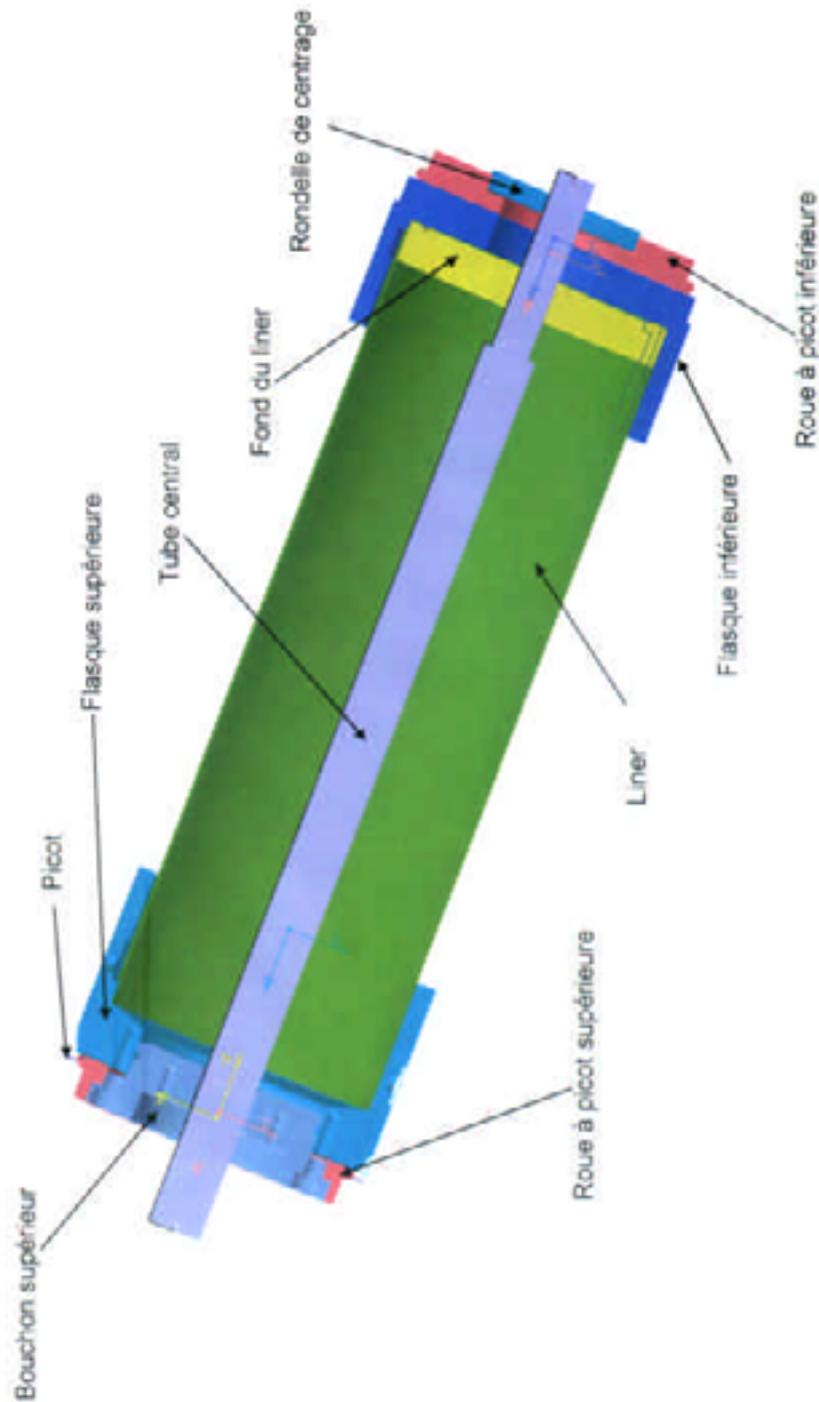




## ANNEXE 4c

### Montage de mise en œuvre du multimatériaux

Bobinage

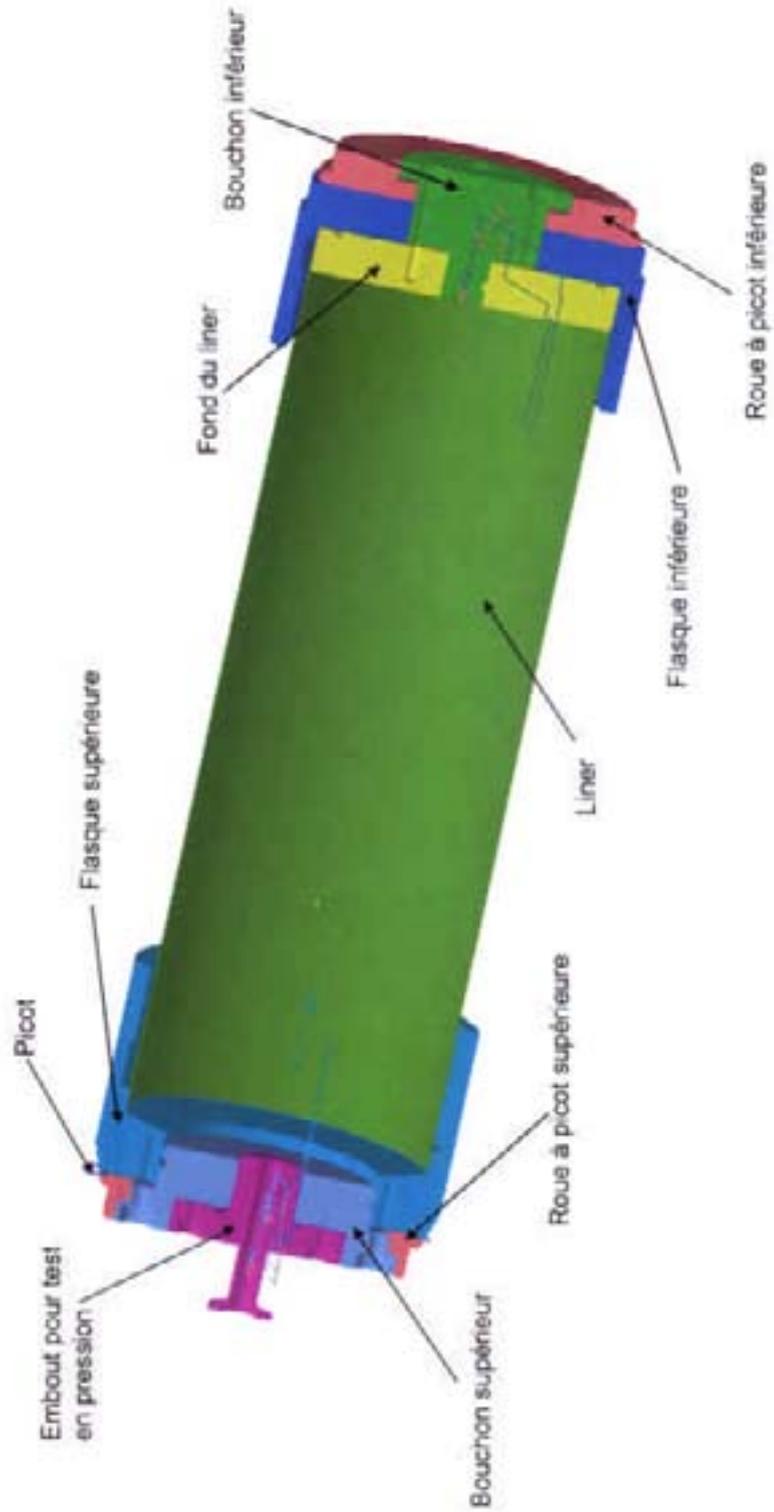




## ANNEXE 4d

### Montage de mise en œuvre du multimatériaux

Tests de mise en pression





## ANNEXE 5

### Procédure de mise en œuvre du multimatériaux

- (1) Coller le liner sur la pièce de fond inférieur
- (2) Fixer l'axe et la pièce d'entraînement du sable sur le fond
- (3) Remplir de sable
- (4) Placer le couvercle de centrage servant à assurer la coaxialité du noyau et de l'axe
- (5) Faire durcir le noyau (paliers à 70°C puis à 120°C)
- (6) Extraire du moule l'ensemble noyau, pièce de fond et liner, puis le placer dans le flasque inférieur
- (7) Placer l'ensemble dans le cylindre principal de l'enceinte, fixer avec le support inférieur, et placer l'isolant
- (8) Coller la partie libre du liner sur l'intérieur du disque supérieur
- (9) Refermer le moule avec le capot supérieur de l'enceinte
- (10) Procéder à l'aspiration du PEHD
- (11) Démontez les capots supérieur et inférieurs puis le cylindre principal
- (12) Usiner les rainures hélicoïdales
- (13) Fixer les roues à picots à chaque extrémité, les tubes rallonge supérieurs et inférieurs
- (14) Bobiner les fibres dans les rainures
- (15) Retirer les rallonges de l'axe puis le noyau en sable
- (16) Placer les bouchons et les raccords pour procéder à la mise sous pression

## **Contribution à la définition d'une démarche de conception de multimatériaux : application à la mise en œuvre d'un réservoir permettant le déconfinement de matières énergétiques**

Cette étude contribue à la définition d'une démarche de conception de multimatériaux d'une part en s'inspirant des méthodes de conception de produits manufacturés, et d'autre part en confrontant la démarche proposée à une étude de cas.

Le travail a consisté en une étude bibliographique des méthodes de conception les plus répandues pour en dégager des principes généraux applicables à une démarche de conception de multimatériaux. L'application de certains aspects de ces principes au cas d'un réservoir permettant le déconfinement de matières énergétique a conduit à la conception d'une paroi multicouche renforcée par un filet de fibres de polyéthylène. Des essais de traction et de fluage à diverses températures ont permis la caractérisation thermomécanique des constituants nécessaire au dimensionnement et à la simulation du comportement de la structure. Enfin, la dernière étape a résidé dans la fabrication d'un réservoir cylindrique adapté à la vérification expérimentale de ses fonctions.

**Mots-clés :** Multimatériaux, Méthode de conception, Analyse fonctionnelle, Fabrication, Simulation numérique, Caractérisation, Fibres polyéthylène

## **Contribution to the definition of a multimaterials design method : application to the manufacture of a tank allowing the deconfinement of energetic matters**

This work helps to define a methodological approach for the design of multimaterials by a bibliographic study on classical design methods, and by an application of the proposed method to the design of a multimaterials for a container devoted to the transportation of energetic matters.

The application of several principles inspired from classical methods has led to the design a multilayer material reinforced by a polyethylene fibres grid. Tensile and creep tests at various temperatures allowed the characterisation of the constituents before determining the parameters of the multimaterials and simulating his behaviour. Finally, this multimaterials has been manufactured and the functions were verified.

**Keywords :** Multimaterials, Design method, Functional analysis, Manufacturing process, Numerical simulation, Characterisation, Polyethylene fibres