N° d'ordre : 3829

THESE

Présentée à

L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES POUR L'INGENIEUR

Par Stéphane GIACCOBI

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : Mécanique et Ingénierie

Méthode de conception de multimatériaux à architecture multicouche : application à la conception d'une canalisation sous-marine

Soutenue le : 16 juillet 2009

Après avis de :

M. Michel ALDANONDO	Professeur, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux	Rapporteur
M. Yves BRECHET	Professeur, INP Grenoble	Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

M. Jean-Pierre NADEAU	Professeur, Arts et Métiers ParisTech, Bordeaux	Président
M. Michel ALDANONDO	Professeur, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux	Rapporteur
M. Yves BRECHET	Professeur, INP Grenoble	Rapporteur
M. Michel DANIS	Professeur, Université Bordeaux 1	Examinateur
M. Jacques RUER	Dir. Adj. Innovation tech. émergentes, SAIPEM SA	Examinateur
M. Hervé WARGNIER	Maître de Conférences, Université Bordeaux 1	Examinateur

Remerciements

L'aboutissement de ce travail de thèse, réalisée sous convention CIFRE dans la société SAIPEM SA, a été rendu possible grâce à une multitude de personnes qui ont su le dynamiser et l'enrichir à leur façon.

J'adresse tout d'abord mes remerciements aux rapporteurs, Michel Aldanondo et Yves Bréchet qui ont bien voulu relire et critiquer ce manuscrit. Mes remerciements vont ensuite aux autres membres du jury, Jean-Pierre Nadeau qui a assuré la présidence du jury, Jacques Ruer qui a pris la responsabilité de l'encadrement de la thèse pour Saipem et qui m'a aidé à prendre de la distance au travers de nos discussions enrichissantes, Michel Danis qui a accepté la charge de diriger cette thèse et a apporté ses compétences pluri disciplinaires et son recul nécessaires à l'aboutissement de ce travail. Enfin, je voudrais remercier Hervé Wargnier qui a suivi de près ce travail et dont les conseils précis dans le maniement des concepts de multimatériaux et l'élaboration des modèles de comportement ont été une aide précieuse.

Je ne peux ensuite qu'évoquer les personnes qui m'ont facilité la préparation de ce doctorat et notamment Claude Valenchon, directeur de la division Développement Technologique de Saipem et les différents encadrants industriels MM. Franck Valliet, Stéphane Anres, Madame Claudia Vivalda.

Mes remerciements s'adressent également aux autres membres de la division Développement Technologique de Saipem qui m'ont fait bénéficier de leur connaissance et de leur compréhension du secteur. Leurs divers apports ont grandement contribué au développement de ma réflexion. Je remercie en particulier Marc Bonnissel, Boris Carlier, Stéphanie Abrand, Sylvain Popineau, Christophe Candelier et Patrice Carlier.

Fort d'une expérience précédente au laboratoire, j'ai bénéficié du soutien de l'ensemble de ses membres. Au cours de mes passages à Bordeaux, vous avez su m'apporter vos critiques, appréciations et bonne humeur : un grand merci à Véronique Favre, Philippe Darnis, Corinne Arvieu, Olivier Mantaux, Eric Lacoste, Marie Lise Barthès, François-Xavier Kromm…

Je renouvelle mes remerciements à Roland Harry pour le plaisir que j'ai eu à travailler à ses côtés par le passé et qui a été à l'initiative de ce projet.

Je tiens à adresser une pensée pleine d'affection à Françoise, Jacques, Christel, Andrew, Alexandre et Géraldine pour avoir tant donné et avoir largement supporté mon projet de thèse.

Merci à mes amis et à ma famille qui m'ont permis de me ressourcer à chaque retour à Toulon, Marseille, Bordeaux, Amboise, Valence, Pau et Rodez.

Merci à ma sœur Cathou, ma grand-mère Babatie et à mes parents Irène et Serge dont le soutien a été essentiel dans l'accomplissement de mon parcours et plus particulièrement au cours de ce travail.

Enfin, merci à Claire pour sa générosité sans limite, sa patience et son réconfort constant.

TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION GENERALE 7

2 ACTIVITE DE CONCEPTION ET METHODES DE SELECTION DES MATERIAUX 11

2.1 ACTIVITE DE CONCEPTION 11

2.1.1 Evolution de l'activité de conception 11

2.1.2 Conception et innovation 13

2.1.3 Classification des problèmes de conception 13

2.1.4 Approches méthodologiques du développement de produit 14

2.1.5 Outils de l'ingénierie concourante 15

2.1.6 Synthèse 18

2.2 METHODES DE SELECTION DES MATERIAUX ET DES PROCEDES DE FABRICATION 19

2.2.1 Stratégies de sélection des matériaux et des procédés 20

2.2.2 Outils de sélection de type « recherche libre » 23

2.2.3 Synthèse 26

2.3 CONCEPTION DES MULTIMATERIAUX 27

2.3.1 Qu'est-ce qu'un multimatériau ? 27

2.3.2 Aide à la conception de multimatériaux 30

2.3.3 Synthèse 37

2.4 CONCLUSION ET ORIENTATION DU TRAVAIL 39

3 APPROCHES METHODOLOGIQUES DE LA CONCEPTION DE MULTIMATERIAUX 41

3.1 INTRODUCTION 41

3.2 PROPOSITION D'UNE DEMARCHE DE CONCEPTION DE MULTIMATERIAUX 41

3.2.1 Rappels sur la conception monolithique 41

3.2.2 Composantes du problème de conception 44

3.2.3 Cadre méthodologique 45

3.2.4 Proposition d'une démarche 47

3.3 MISE EN ŒUVRE DE LA DEMARCHE DE CONCEPTION 52

3.3.1 Résolution d'un problème élémentaire de conception 52

3.3.2 Application à un cas d'école 56

3.3.3 Extension de la démarche de résolution 62

3.4 CONCLUSION 69

4 VALIDATION DE LA DEMARCHE APPLIQUEE A LA CONCEPTION DE CONDUITES SOUS-MARINES 71

4.1 INTRODUCTION 71

4.2 POSITION DU PROBLEME *71*
4.2.1 Présentation d'une exploitation offshore 71
4.2.2 Problèmes de l'offshore ultra profond 73
4.2.3 Les voies de recherche et développement 75
4.2.4 Etude bibliographique des canalisations sous-marines de type multimatériaux 78
4.2.5 Etude fonctionnelle d'une conduite 83
4.3 PRESENTATION DU PROBLEME DE CONCEPTION *90*
4.3.1 Contexte industriel 90
4.3.2 Cahier des charges fonctionnel d'une flowline de production 90
4.3.3 Traduction du problème de conception : quels sont les objectif(s), les astreintes et les variables libres du problème ? 93
4.4 RESOLUTION DU PROBLEME DE CONCEPTION *97*
4.4.1 Introduction 97
4.4.2 Conception monolithique 98
4.4.3 Conception multimatériau : solutions à deux couches 109
4.4.4 Conception multimatériau : solutions à trois couches 133
5 SYNTHESE GENERALE ET PERSPECTIVES 149
6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 153
7 ANNEXES 159

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Coût d'un produit au cours du cycle de vie [DEC98] 12
Figure 2-2 : Les deux approches de développement de produit [GIA96] 15
Figure 2-3 : Gestion du cycle de vie d'un produit [GES05] 16
Figure 2-4 : Stratégies de sélection des matériaux et des procédés [ASH04] 20
Figure 2-5 : Hiérarchisation des données matériaux. Source : [ASH04] 22
Figure 2-6 : Représentation de l'information sur les matériaux et les procédés [GUP03] 23
Figure 2-7 : Etapes de sélection des matériaux et des procédés selon Ashby [ASH99] 25
Figure 2-8 : Absorbeur d'énergie (Source www.tudelft.nl) 27
Figure 2-9 : Vêtement pour astronaute [MAR04] 28
Figure 2-10 : Tube Flexible 28
Figure 2-11 : Les matériaux hybrides combinent les propriétés de plusieurs matériaux. La performance du matériau résultant dépend également de la géométrie d'ensemble de la combinaison mais également des interactions entre constituants. Source : [ASH03] 29
Figure 2-12 : Multimatériau de type sandwich. Extrait de [ASH01] 32
Figure 2-13 : Synthèse de la démarche de conception de multimatériau proposée par [KRO02] .. 34
Figure 2-14 : Organigramme de conception de multimatériau selon Castillo [CAS04] 36
Figure 3-1 : Diagramme des opérations successives pour la conception de structure multimatériau à architecture donnée 49
Figure 3-2 : Possibilité de combinaison de deux matériaux M_1 et M_2 [ASH03] 50
Figure 3-3 : Différentes positions du nuage de points 53
Figure 3-4 : Exemples de couplage 55
Figure 3-5 : Recherche de l'optimum de conception pour un couple de constituants donné. 55
Figure 3-6 : Objet de la conception 56
Figure 3-7 : Filtrage des matériaux de la base de données 58
Figure 3-8 : Architecture multicouche de la poutre multimatériaux 59
Figure 3-9 : Filtrage des combinaisons admissibles 60
Figure 3-10 : Combinaison des constituants 61
Figure 3-11 : Les solutions pour le couple acier - mousse polyuréthane. 67
Figure 4-1 : Représentation schématique d'une exploitation offshore (source SAIPEM) 72
Figure 4-2 : Répartition des rôles entre un opérateur et une société d'ingénierie 76
Figure 4-3 : Graphe des interactions de conduites offshore 85
Figure 4-4 : Décomposition logique des fonctions d'une canalisation offshore 86
Figure 4-5 : Schéma de principe de la méthode de pose en J 91

Figure 4-6 : Schéma de principe de la ligne en service....91
Figure 4-7 : Simplification du problème de conception : passage 3D/1D....95
Figure 4-8 : Répartition des classes de matériaux de la base de données....99
Figure 4-9 : Séquences des opérations de filtrage....104
Figure 4-10 : Représentation schématique du problème de conception....109
Figure 4-11 : Filtrage préliminaire de la base de données : diagramme des épaisseurs pour un matériau « M » donné....116
Figure 4-12 : Système d'isolation de canalisation ThermoFlo® de Bredero Shaw....118
Figure 4-13 : Principe de recherche de combinaisons de matériaux admissibles....121
Figure 4-14 : Solutions multimatériau pour le couple 203-311 (2000 m)....126
Figure 4-15 : Solutions multimatériau pour le couple 203-311 (2000 m)....128
Figure 4-16 : Découpage des résultats....136
Figure 4-17 : Solution au problème à 2000 mètres pour le multimatériau constitué des couches 304-207-401 (304 : Stainless steel , 207 : Polyurethane foam, 401 : Butyl Rubber unfilled) 143
Figure 4-18 : Solution au problème pour le multimatériau à 2000 mètres de profondeur....146

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Création des groupes de matériaux....58
Tableau 3-2 : Solutions optimales pour le couple acier - mousse polyuréthane....67
Tableau 4-1 : Cycle de vie d'une canalisation sous-marine....83
Tableau 4-2 : Fonctions principales et fonctions contraintes d'une canalisation sous-marine....85
Tableau 4-3 : Cahier des charges fonctionnel d'une flowline de production....92
Tableau 4-4 : Extrait de la base de données....100
Tableau 4-5 : Astreintes et condition de satisfaction des astreintes de conception....102
Tableau 4-6 : Filtrage sur les propriétés matériaux....105
Tableau 4-7 : Filtrage des matériaux....106
Tableau 4-8 : Affectation des astreintes aux couches du tube bimatériau....110
Tableau 4-9 : Conditions de satisfaction des astreintes de conception....112
Tableau 4-10 : Affectation des astreintes de conception....115
Tableau 4-11 : Liste de matériaux ayant passé les filtres préliminaires (Profondeur 2000m)....117
Tableau 4-12 : Résultats de dimensionnement....121
Tableau 4-13 : Extrait du codage des matériaux et combinaison....122
Tableau 4-14 : Couples de matériaux identifiés comme candidats du multicouche à 2000 m....123
Tableau 4-15 : Bilan des solutions (2000 m)....128
Tableau 4-16 : Classement des solutions à la profondeur de 2000 mètres....130
Tableau 4-17 : Réduction de l'espace de recherche de solutions (2000m)....131
Tableau 4-18 : Affectation des astreintes de conception....133
Tableau 4-19 : Liste de matériaux ayant passé le filtre préliminaire (Profondeur 2000m)....134
Tableau 4-20 : Résultats de la sélection pour les profondeurs 2000, 2500 et 3000 mètres....137
Tableau 4-21 : Résultats de conception de multimatériaux à trois couches....144
Tableau 4-22 : Répartition des solutions en fonction du coût et de la profondeur....146

1 INTRODUCTION GENERALE

Conception préliminaire et sélection de matériaux

Au cours de la phase de conception préliminaire, le concepteur est amené à réaliser des choix afin de définir les variables de conception. Ces variables caractérisent l'objet de la conception. Il s'agit des matériaux, de la géométrie et du procédé de mise en œuvre.

Des méthodes spécifiques ont été développées pour aider le concepteur dans son travail. Elles sont considérées comme un support d'aide à la conception. Appliquées à la recherche de matériaux, on parle de méthodes de sélection de matériaux.

La première qualité d'un système d'aide à la conception est d'être aussi objectif que possible. La garantie d'un choix objectif permet d'apporter l'assurance que le produit de la conception est conforme au besoin du client.

La seconde qualité d'une méthode de sélection est de proposer une diversité de solutions envisageables. En effet, la conception préliminaire ne constitue que la première étape du processus de développement. D'autres critères seront ajoutés et précisés au cours des étapes ultérieures du développement. Les choix seront nécessairement limités par ces critères complémentaires.

La troisième et dernière qualité est de conduire à un choix de conception optimisé. Pour cela, il est nécessaire que l'équipe de conception détermine, avec la plus grande justesse, les objectifs de conception qui constitueront les performances à optimiser. Dans bien des cas, l'un des objectifs sera de minimiser le coût du produit. Un autre exemple d'objectif que l'on rencontre souvent en conception est la recherche d'une solution à masse minimale.

Par conséquent, les outils de sélection des matériaux et de procédés doivent être en mesure de gérer des cahiers des charges complexes.

Vers un choix de solutions multimatériaux et la proposition d'une nouvelle approche

Lorsqu'il n'y a pas de solutions matériaux, il peut être nécessaire de procéder à la révision du cahier des charges fonctionnel car on peut avoir imposé des contraintes superflues ou encore des niveaux de contraintes trop élevés. Cela conduit à éliminer des solutions qui auraient pu être retenues.

Si le problème ne trouve toujours pas de solutions, le concepteur peut orienter la conception vers la définition d'un multimatériau. La notion de multimatériau sous entend la définition de la combinaison des constituants. Cette combinaison se caractérise entre autre par une échelle et une architecture de combinaison. L'échelle peut être vue à plusieurs niveaux. Par

analogie avec la mécanique, on parle d'échelle micro, méso ou macroscopique. L'architecture du multimatériau peut, quant à elle, se décliner à l'infini.

Pour concevoir une solution multimatériau optimisée, il faut que le concepteur puisse réaliser des choix objectifs sur l'ensemble de ces paramètres. Devant l'étendue des choix, il n'est pas envisageable de proposer d'emblée une méthode de conception généralisée. A ce niveau, nous choisissons de recentrer la méthode de conception sur un multimatériau particulier de type multicouche.

Par conséquent, notre étude s'oriente vers la proposition d'une méthode de conception dont l'architecture est donnée : la méthode de conception devient une méthode de sélection des constituants du multimatériau et doit permettre de proposer des solutions optimisées répondant aux critères définis dans le cahier des charges fonctionnel.

Le premier volet de ce travail consiste à proposer une nouvelle approche de conception de produits multimatériaux. Le second volet est la validation de la méthode au travers d'une application spécifique. La phase de validation doit permettre de mettre en évidence l'intérêt et les limites de la méthode proposée.

Validation de la méthode proposée : application au cas des conduites offshore

La méthode est appliquée sur des conduites sous-marines utilisées pour exploiter les gisements d'hydrocarbures situés en grandes profondeurs. Dans le contexte actuel, la mise en production de réserves non conventionnelles devient envisageable mais il y a des limites techniques qu'il faut pouvoir dépasser.

Par définition, les gisements dits conventionnels contiennent des réserves d'hydrocarbures qui sont exploitables techniquement et économiquement, dans les conditions d'un marché donné. Les gisements situés dans les très grandes profondeurs d'eau, on parle de profondeur allant de 1500 à 3000 mètres, étaient encore récemment considérés comme des réserves non conventionnelles. L'augmentation prévisible des cours du baril ouvre de nouvelles perspectives de marché. Il est raisonnable de penser que les moyens financiers seront disponibles pour financer l'extraction de ces ressources. Cependant malgré un afflux massif de moyens financiers, il faut que les techniques évoluent car dans ces profondeurs extrêmes, les conditions d'exploitation deviennent particulièrement sévères. En particulier, les canalisations sous-marines, traditionnellement construite à base d'acier au carbone, deviennent trop lourdes.

La filière industrielle parapétrolière a anticipé ces nouvelles conditions d'exploitation depuis de nombreuses années. En particulier, l'utilisation de matériaux composites et plus largement des multimatériaux a été envisagée pour se substituer à l'acier. Sauf exception dont

nous n'avons pas connaissance, on a constaté que les solutions proposées sont toutes basées sur une architecture multicouche. Pour satisfaire la demande en pétrole toujours croissante et dans le contexte de l'ultra profond actuel, on peut imaginer que les solutions multimatériaux peuvent voir le jour. Or, les méthodes industrielles de conception de canalisations sous-marines n'apportent pas la latitude nécessaire pour développer ce type de conduites : elles imposent une contrainte forte qui limite notamment le choix de matériau. L'application de la méthode de conception multimatériau proposée dans cette thèse devrait permettre de proposer des solutions alternatives aux solutions traditionnelles. On traitera donc le cas particulier de la conception de conduites sous-marines. Partant d'un cahier des charges fonctionnel, nous chercherons à définir des choix de matériaux entrant dans la constitution de multimatériaux à architecture multicouche axisymétrique.

Plan du manuscrit

L'ambition de cette étude est d'apporter une contribution aux développements de méthodes de conception de multimatériaux. Il faut tout d'abord positionner l'activité de conception et le champ d'application de la méthode. Ainsi au cours du chapitre 2, on présentera un tour d'horizon de l'activité de conception et des méthodes de sélection de matériaux. A travers cette étude, nous verrons si les méthodes de conception de multimatériaux existantes peuvent être exploitées en l'état pour concevoir des multimatériaux multicouches.

Ayant établi la nécessité de développer une nouvelle approche spécifique, nous analyserons ensuite le cadre de la conception des produits de type multicouche. Le chapitre 3 sera ensuite consacré à la proposition d'une nouvelle approche de conception et des outils nécessaires à son application.

Le chapitre 4 sert de test de validation de la méthode de conception proposée au chapitre 3. Partant de l'analyse fonctionnelle des canalisations sous-marines, nous établirons le cahier des charges d'une application particulière. Nous appliquerons notre démarche de conception et les résultats seront comparés aux solutions actuelles ou pressenties.

2 ACTIVITE DE CONCEPTION ET METHODES DE SELECTION DES MATERIAUX

2.1 ACTIVITE DE CONCEPTION

La réussite d'un industriel tient dans sa capacité à satisfaire la demande du client en lui proposant des solutions performantes, de qualité et à coûts modérés. Pour assurer ce rôle, un industriel doit organiser son activité de développement de produit et notamment la phase de conception. Cette organisation de l'activité de conception de produit est l'objet de ce premier chapitre. Nous faisons ici un tour d'horizon des méthodes qui dominent cette activité.

2.1.1 Evolution de l'activité de conception

Pour comprendre l'approche classique de la conception il est tout d'abord nécessaire de revenir sur les premières formes d'organisation de la conception. La structuration de l'activité de conception commence avec la première révolution industrielle et la mise sur le marché des machines à vapeur, des machines outils et le déploiement du chemin de fer. Pour mettre au point ces machines innovantes, il a fallu coordonner l'ensemble des activités et capitaliser les savoirs de façon à soutenir la croissance des entreprises. Les premières formes d'organisation de la conception apparaissent et se développent sous l'influence d'écoles destinées à former des ingénieurs capables de maîtriser à la fois la technique et le processus du projet. La technique est alors formalisée pour être diffusée et réutilisée sous forme de règles métier. On voit alors apparaître une spécialisation des acteurs du développement industriel ainsi que la séparation des différents secteurs de l'entreprise. Alors que l'artisan était concepteur-réalisateur, l'ingénieur se concentre sur la conception et fournit ensuite les informations pour sa réalisation. Cette partition des activités est une caractéristique remarquable de l'approche héritée du XIX^{ème} siècle. [HAT05]

Au début du XX^{ème} siècle, l'ingénieur américain Taylor propose une organisation scientifique du travail (OST) dont l'objectif est d'améliorer la productivité des entreprises. Pour atteindre cet objectif, l'OST repose sur trois points : diminuer la circulation systématique des ouvriers dans l'atelier, développer des méthodes de fabrication optimale et intéresser financièrement les ouvriers les plus méritants (sur la cadence constatée). Ce modèle d'organisation impose alors une fragmentation maximale des taches dans l'atelier (division horizontale), et une segmentation verticale reposant sur une séparation complète du développement depuis la conception au bureau d'études jusqu'à la réalisation dans l'atelier. Ford

s'inspire largement des principes tayloriens en proposant le travail à la chaîne, la standardisation et toujours la contrepartie salariale aux opérateurs les plus productifs.

Malgré les apports évidents du taylorisme sur le développement économique (augmentation des cadences, production de masse et consommation de masse), ces modèles ne sont pas exempts de défauts (déqualification du personnel, faible capacité d'adaptation des entreprises aux évolutions de marché, segmentation verticale de l'entreprise [BRI05]).

Dans un monde en crise depuis le début des années mille neuf cent soixante dix, il est apparu nécessaire de repenser l'entreprise dans son ensemble et, dans les dernières décennies, les entreprises ont évolué pour maintenir leur compétitivité. L'effort a d'abord porté sur l'amélioration des méthodes de production. Il s'agissait d'apporter de la souplesse dans l'outil industriel, de responsabiliser les équipes et d'améliorer la qualité du processus de production. Mais ces améliorations n'ont pas suffi et les efforts se sont orientés vers l'activité de conception.

On mesure le caractère incontournable de la phase de conception sur la réussite d'un produit au travers du graphique suivant dans lequel le coût relatif de chaque étape du cycle de vie d'un produit est reporté en ordonnée. L'essentiel des dépenses est réalisé au cours des étapes de production et lorsque le produit est sous garantie (courbe 2). La courbe 1 indique l'impact des décisions sur le coût du produit : en début de cycle, au stade de la pré étude, les choix réalisés engagent 80% du coût global d'un projet.

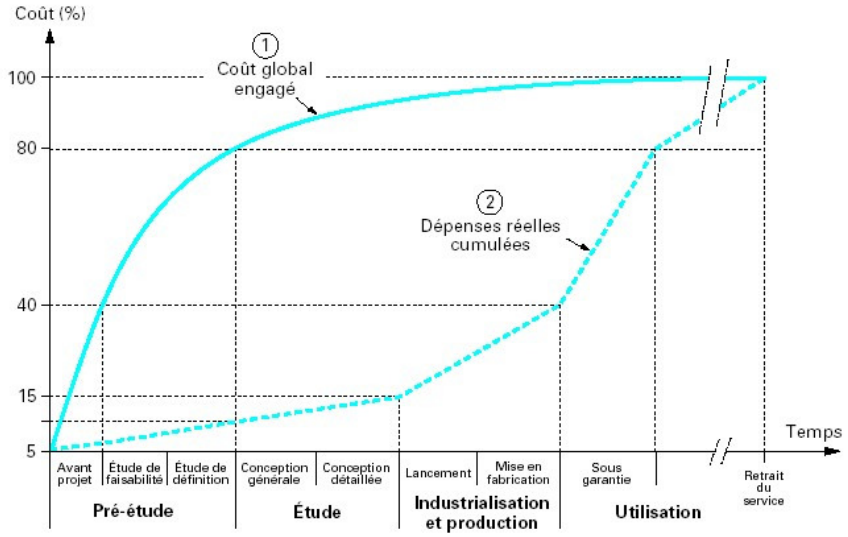


Figure 2-1 : Coût d'un produit au cours du cycle de vie [DEC98]

Pour améliorer sa compétitivité, l'industriel doit se consacrer à l'optimisation de l'outil de production car 25% des dépenses sont réalisées lors de l'industrialisation. L'étape de conception préliminaire (pré-étude) quant à elle, représente moins de 15% du coût d'un produit, mais

contrairement à l'étape d'industrialisation, c'est lors de l'étape de conception qu'on prend la majorité des décisions. Selon ce point de vue, l'activité de conception est au cœur de la réussite d'un projet : le cycle de vie du produit est inégalement réparti en termes de dépenses et les économies possibles sont importantes si l'entreprise parvient à mieux maîtriser l'étape de conception car c'est elle qui engage la majorité des dépenses du projet.

2.1.2 Conception et innovation

Selon L'OCDE, une innovation de produit est l'introduction d'un bien (ou d'un service) nouveau ou nettement amélioré en regard de ses caractéristiques fondamentales. Cette définition inclut les améliorations significatives des spécifications techniques, des pièces, des matériaux, des logiciels intégrés, de la facilité d'utilisation ou de toute autre caractéristique fonctionnelle.

Cette définition de l'innovation ne fait pas état de la conception. Or il existe systématiquement une phase de conception pour aboutir à un produit innovant [DIG03]. Cette idée rejoint la proposition de Forrest qui considère que « toute amélioration dans la compréhension, la description ou le pilotage du processus de conception sera un pas vers l'amélioration potentielle du processus d'innovation » [FOR97]. L'innovation est un moteur de croissance économique et la conception soutient, organise et permet le développement économique de l'entreprise : malgré une transformation continue de la nature de l'innovation, Hatchuel rappelle que « la compétition par l'innovation constitue une donnée essentielle du capitalisme contemporain » [HAT05].

Ce faisant, la relation entre conception et innovation fait l'objet d'études approfondies. Forrest [FOR04] souligne le manque crucial d'analyse économique du processus de conception non par manque d'intérêt de la discipline puisque l'innovation est au centre de l'activité économique des pays industrialisés, mais par manque d'indicateur traduisant l'impact de la conception sur le développement économique. Malgré cela, il faut probablement interpréter les efforts combinés des chercheurs et des industriels pour proposer et réinventer les modèles de représentation du processus de conception (favorisant le soutien de l'innovation) comme une voie prometteuse permettant de soutenir le développement économique.

2.1.3 Classification des problèmes de conception

Un rapport de la DiGITIP de 2003 donne une définition de la conception [DIG03] : « la conception est le processus qui permet à l'entreprise de passer d'une idée de produit – un besoin – à sa concrétisation physique, en définissant également les moyens de sa fabrication ». Deux attributs caractéristiques de la conception se trouvent dans cette définition : (i) l'objet étudié et (ii)

le processus nécessaire à son développement. Une classification de la conception relativement consensuelle [YAN01], issue des travaux de Chandrasekaran décrit la conception selon le degré de connaissance de ces deux attributs caractéristiques : les trois types de conception sont alors définis comme conception routinière, conception innovante et conception créative.

La situation la plus courante est la conception routinière. Dans ce type de conception le cahier des charges est connu a priori et ne varie que de manière quantitative. Les solutions à apporter à un problème de conception routinière suivent un parcours relativement bien balisé. Les besoins sont traduits en cahier des charges, lui-même est alors traduit en sous problèmes définis à l'avance. Suivant le niveau de contraintes requis dans le cahier des charges, le concepteur aura le choix entre plusieurs alternatives prédéterminées, correspondant aux différentes classes de sous problèmes.

Lorsque la conception est innovante, le concepteur est face à un problème correctement identifié et quelques propositions de solutions peuvent être déjà établies. La conception innovante porte alors sur une amélioration de l'existant. Elle peut concerner l'amélioration de la méthode d'obtention du produit ou le transfert d'une technologie existante sur une solution existante [SCA04].

La conception créative est le dernier niveau de cette classification. Selon Durruvu, l'élément clé de la conception créative est la transformation de l'inconscient en conscient [DUR89]. En contexte de conception créative, il est nécessaire de tout penser, l'objet à concevoir et le processus de résolution pour y parvenir. Le concepteur créatif aura pour tache de proposer à la fois une idée nouvelle, des modes de représentation nouveaux et des démarches de résolutions nouvelles : on parle de conception sans contrainte [ZRE90].

Au delà de cette classification générale des problèmes de conception, de nombreux auteurs se sont penchés sur d'autres formes de classification. En particulier, Brown [BRO93] affine la typologie générale. On retiendra essentiellement que ces autres formes de conception permettent de positionner l'activité du concepteur en caractérisant le niveau d'abstraction de la solution développée. On obtient alors un vocabulaire adapté à une grande majorité de situations possibles parmi lesquelles on peut citer la conception préliminaire, conceptuelle, re-conception, paramétrique.

2.1.4 Approches méthodologiques du développement de produit

Les deux visions présentées dans ce paragraphe reflètent l'adaptation nécessaire de l'industrie à un monde en évolution : l'approche séquentielle, vision passée de la conception est alors opposée à l'approche concourante, vision plus récente et en devenir, illustrées Figure 2-2.

Dans l'approche séquentielle, les étapes du développement de produit se succèdent de façon strictement séquentielle, sans anticipation, alors que l'approche concourante (ou simultanée) prône la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie du produit depuis l'étape de conception jusqu'à la fin de vie.

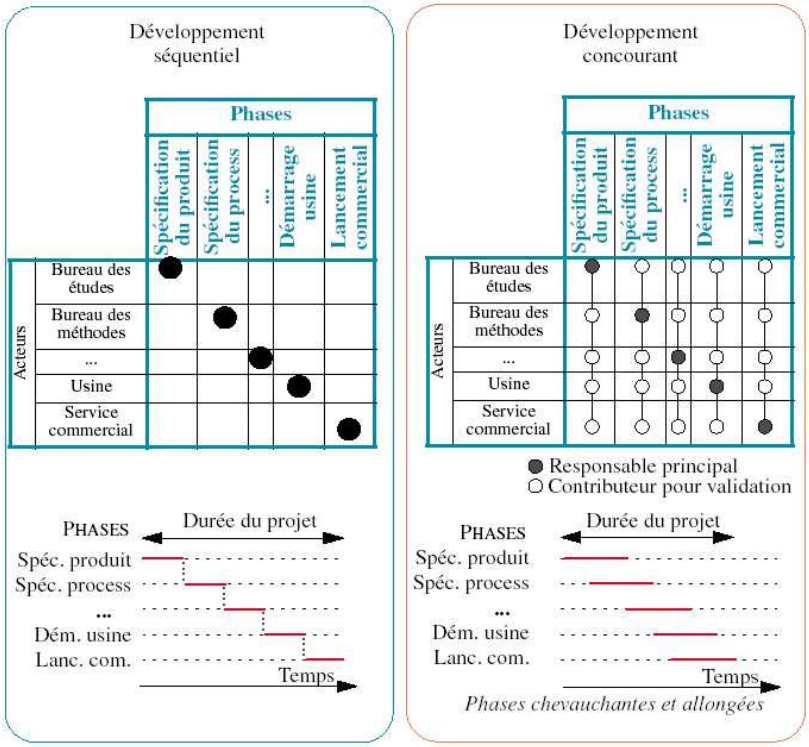


Figure 2-2 : Les deux approches de développement de produit [GIA96]

La partition stricte des activités a montré ses limites et la nouvelle forme d'organisation du développement de produit, ou ingénierie concourante, grâce au chevauchement des étapes de conception, apporte un liant au développement car les différents « corps de métiers » interviennent plus tôt dans le processus de développement. Cette approche amène plusieurs avantages :

- les étapes de développement bien qu'étant plus longues, conduisent par leur recouvrement partiel à raccourcir la durée globale du développement ;
- la collaboration active entre les différents acteurs de l'élaboration du produit permet de pallier l'irréversibilité du processus de conception particulièrement pénalisante.

2.1.5 Outils de l'ingénierie concourante

L'approche défendue par l'ingénierie concourante est d'abord la mobilisation de toutes les

expertises lors de la prise de décision ; ensuite, le chevauchement des étapes de conception permet l'anticipation et la réduction du cycle de conception. Pour faciliter l'application d'une telle approche, les industriels et les chercheurs en tous domaines ont porté l'effort sur la mise en place d'outils et de méthodes applicables dans le contexte d'un projet (Figure 2-3).

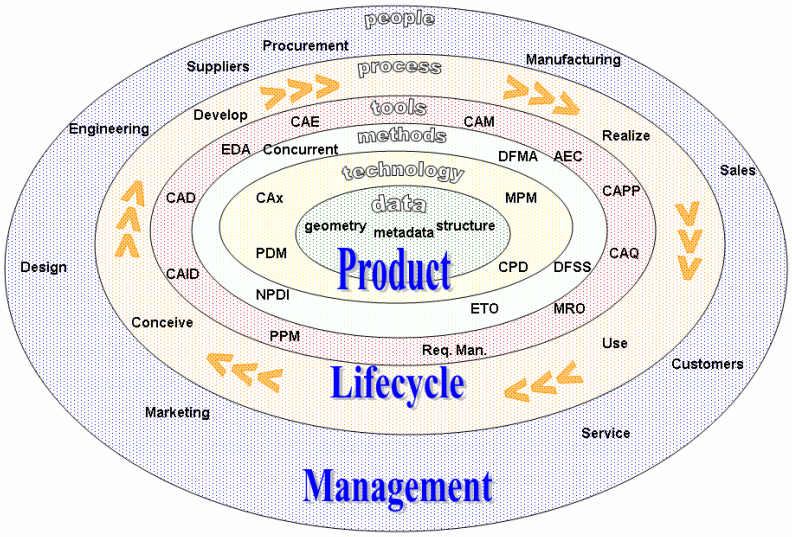


Figure 2-3 : Gestion du cycle de vie d'un produit [GES05]

Les principes de base de l'ingénierie concourante ont donné naissance à une multitude d'outils de conception, comme l'aide à la prise de décision, à l'organisation ou la gestion de la qualité. Ainsi, Deneux [DEN02] rapporte les résultats de l'étude de Vadcard [VAD95] qui distingue sept catégories d'activités liées à la conception de produit :

- Caractérisation du besoin : Analyse fonctionnelle, QFD, FAST, APTE…
- Recherche de solution : Brainstorming, Concassage, Matrice de découvertes…
- Définition du produit : Graphe de démontage, architecture produit, dessins techniques…
- Matérialisation de solution : maquette ou prototype, logiciels de CAO, de synthèse d'image, outils de simulation…
- Analyse de solution : AMDEC, bloc diagramme, arbre de défaillances, analyse de la valeur…
- Gestion de projet : compte rendu, organigramme, diagrammes (Gantt), documents de coûts (suivi financier du projet)…
- Gestion de la qualité : diagrammes cause-effets, diagramme d'affinité, PARETO, plans d'expériences …

Il est évident que chaque acteur du développement ne peut pas devenir un spécialiste confirmé de chaque domaine du cycle de vie d'un produit. D'abord parce que les différentes étapes de développement concernent des communautés distinctes de l'entreprise (les achats et l'ingénierie par exemple) et ensuite parce qu'à chaque action générée par le développement, correspondent des méthodes et des outils spécifiques. Dans l'action, un professionnel aura donc à sa disposition des outils correspondant à une situation particulière, qui viendront en support de son activité. Pour donner un exemple, à l'étape de définition du produit, le dessinateur industriel avait pour support un dessin technique, lui permettant de donner une représentation du produit à une étape donnée du développement. Les outils actuels utilisent intensivement l'informatique ce qui a favorisé le développement de la Conception Assisté par Ordinateur (CAO). Ces outils sont particulièrement adaptés à un travail collaboratif, permettant de gérer la conception de systèmes complexes en facilitant l'échange d'information, la mise à jour des versions du produit, et la réutilisation des travaux antérieurs pour une nouvelle conception en utilisant des bibliothèques de formes génériques.

L'utilisation des outils de CAO est réservée à une étape relativement avancée du processus de conception au cours de laquelle le concepteur connaît le besoin et construit la pièce. Or la conception de produit est un processus visant à répondre à un besoin énoncé par une solution technique. La satisfaction du besoin en conception mécanique revient à vérifier l'adéquation entre les attendus (de la part du client) et la solution produite (traduction physique du besoin). Le passage du besoin à la solution traverse les étapes suivantes :

- l'expression du besoin,
- la traduction fonctionnelle du besoin,
- la recherche et la sélection de solution,
- l'évaluation et l'optimisation de la solution,
- la vérification de la satisfaction définitive du besoin.

Pour initier cette démarche, des outils utilisables aux premières étapes de la conception ont été développés. L'analyse fonctionnelle intervient lors de l'expression du besoin, sous un format fonctionnel, c'est-à-dire que le besoin est traduit en fonction et non en solution. De façon plus rigoureuse, la norme AFNOR NFX50-151 (1991), définit l'analyse fonctionnelle comme « une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions ». Toujours selon cette norme, l'analyse fonctionnelle s'applique à la création ou à l'amélioration de produit. Cette méthode est également à la base de la traduction du besoin sous forme de cahier des charges fonctionnel (CdCF). C'est une référence permettant de relier au cours du processus d'élaboration le problème de départ et la solution à venir. L'analyse

fonctionnelle est ainsi très utile dès les premières étapes de conception et son déploiement peut s'organiser autour de quelques outils graphiques proposés par la méthode APTE [BRE00].

2.1.6 Synthèse

Le développement de produits tend aujourd'hui vers les prescriptions de l'ingénierie concourante et tous les acteurs de la conception avancent en parallèle vers la satisfaction du besoin. Cette approche de la conception implique certaines démarches formelles permettant de conceptualiser le processus de conception. Sur cette base, des méthodes et des outils au caractère plus applicable que les approches théoriques ont été explicitées. Il en ressort une multitude d'outils dédiés à l'aide à la prise de décision, à la caractérisation du besoin, à l'évaluation des solutions… Cet ensemble d'outils participe à la mise en place d'une démarche d'ingénierie concourante. Le concepteur retiendra cependant qu'il n'existe pas de méthode unique, il s'agit plutôt d'imaginer l'aide à la conception comme une boîte à outils, chacun des outils ayant été conçu pour faire face à des situations très diverses.

Les premières activités réalisées en conception (étape dite de conception préliminaire) ont un impact important sur la réussite d'un projet notamment parce que les décisions prises en amont peuvent enfermer la conception dans un cadre trop restrictif. Ainsi, les choix effectués au cours des étapes amont sans connaissance de leurs implications futures peuvent conduire à de graves erreurs de conception, entraînant parfois l'échec du projet. Pratiquer avec soin les premières étapes de la conception est donc une nécessité permettant de minimiser les risques inhérents à tous nouveaux développements. En particulier, cette première approche a permis de rappeler que l'analyse fonctionnelle est une étape fondamentale du processus de conception.

Toute procédure de conception implique les étapes de sélection de matériaux, de formes, et de procédés de mise en œuvre. Pour guider le concepteur dans ces choix, il est nécessaire de mettre en place une approche rationnelle de conception. Des méthodes et des outils d'aide à la conception permettent d'orienter ces choix. Nous proposons de les étudier dans le prochain chapitre pour déterminer s'ils sont applicables au problème de l'industriel.

2.2 METHODES DE SELECTION DES MATERIAUX ET DES PROCEDES DE FABRICATION

La sélection des matériaux et des procédés de fabrication (SMP) est intégrée dans l'étape de conception d'un produit, au même titre que l'étape d'élaboration du cahier des charges ou la recherche de concepts de solution. Les démarches qui la constituent évoluent en fonction du type de conception et de l'état d'avancement du projet.

On compte trois types de conception (introduits dans le paragraphe précédent) : la conception peut être routinière, innovante ou créative. En conception routinière, les concepteurs ne pratiquent que des évolutions sur des produits déjà existants. Le choix de matériau et des procédés de mise en œuvre est donc limité à des solutions déjà connues. A contrario, en contexte de conception innovante ou créative, l'équipe de conception n'a pas d'idée préconçue sur le produit final. La marge de manœuvre du concepteur est donc beaucoup plus large et deux cas extrêmes peuvent alors se trouver : le concepteur peut soit puiser dans les solutions existantes pour proposer une nouvelle conception, soit créer un nouveau matériau ou proposer un nouveau procédé de fabrication original. Entre ces situations extrêmes, l'équipe de conception doit savoir réutiliser sa propre expérience, s'adapter à de nouvelles méthodes de fabrication ou à de nouveaux matériaux encore peu ou pas utilisés dans l'entreprise ou, de façon plus générale, dans le domaine industriel.

La SMP dépend également de l'état d'avancement du projet. Au départ du projet, il y a le besoin, plus ou moins bien formalisé, susceptible d'évoluer. A mesure qu'avance le projet, le produit subit des transformations pour conduire à l'objet physique, sensé être la réponse la plus fidèle au besoin client. A chaque phase de conception, la SMP prend des formes différentes car elle traite un niveau de détail différent. Les méthodes de SMP et les outils associés doivent donc évoluer pour correspondre à chacune des phases du développement du produit.

L'étude abordée ici se positionne dans un contexte de conception innovante, et on recherche une méthode applicable à la phase préliminaire de la conception. Le but est de mettre au point des démarches et des outils orientés vers la conception de multimatériaux. Avant de traiter la conception des multimatériaux, il semble logique d'aborder les démarches applicables à la conception de pièces utilisant un seul matériau. Cette partie aborde les enjeux liés à la sélection des matériaux et illustre certaines démarches par des exemples choisis.

2.2.1 Stratégies de sélection des matériaux et des procédés

Une stratégie de sélection vise à coordonner les actions du concepteur pour répondre au besoin formalisé dans le cahier des charges fonctionnel. Ce dernier est plus ou moins bien établi notamment en contexte de conception créative ou innovante. Par contre, en conception routinière, on peut s'attendre à avoir un cahier des charges où les fonctions sont correctement définies avec néanmoins une évolution possible du niveau des requêtes fonctionnelles. Il est donc logique que le contexte de la conception conditionne le choix d'une stratégie.

Une classification des stratégies de sélection des matériaux et des procédés a été proposée par Ashby et Bréchet [ASH04]. Ils présentent trois types de stratégies (voir Figure 2-4) : la recherche libre ou à requêtes ouvertes, le questionnaire expert et la recherche de solutions par analogie.

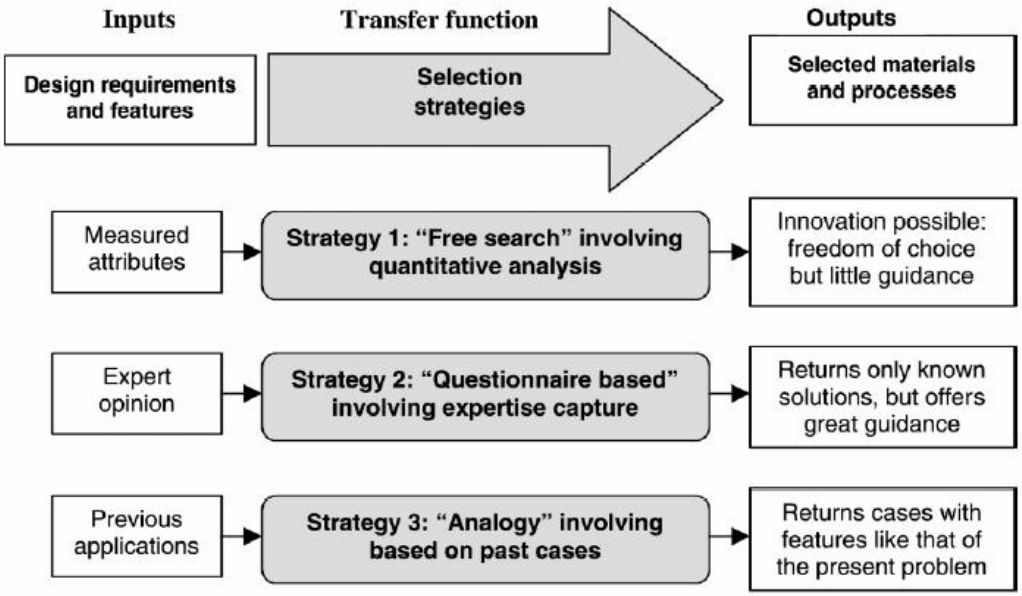


Figure 2-4 : Stratégies de sélection des matériaux et des procédés [ASH04]

Il est intéressant de noter que ces outils possèdent un point commun : ils sont tous basés sur l'exploitation d'une base de connaissances spécifique [DEN07]. C'est le point de départ de toutes procédures de sélection. Ensuite, la stratégie va définir la procédure qui va guider le concepteur dans ses choix en puisant l'information dans la base de connaissances.

Si l'équipe de conception de produit a toujours affaire au même type de cahier des charges, comme c'est le cas en conception routinière, les outils de sélection par analogie ou via un questionnaire semblent bien indiqués car ils sont basés sur l'exploitation de l'expérience passée. Dans le cas d'une conception innovante, le concepteur doit ouvrir son champ d'investigation : il

pourra développer une stratégie de sélection par analogie pour bénéficier des conceptions ayant fait leurs preuves par le passé, mais les démarches à requêtes ouvertes semblent également bien indiquées car elles ne sont pas limitées aux cas existants. L'étude abordée ici se positionne dans un contexte de conception innovante, il convient de préciser les démarches adaptées à ce type de conception.

Stratégie par analogie

La revue bibliographique révèle plusieurs études sur la sélection des matériaux et des procédés suivant une stratégie par analogie. On a retenu deux exemples significatifs. Le premier traite de la conception des câbles sous-marins [MEJ01]. Les auteurs montrent que les données matériaux nécessaires pour réaliser la conception de câbles sous-marins ne sont pas toujours disponibles dans les bases de données de matériaux usuelles. En particulier les informations sur la durée de vie de ces câbles (prévue pour 25 ans) nécessitent la mise en place de campagnes d'essais spécifiques. Ces phases d'expérimentation étant longues et coûteuses, il est préférable, si l'information est disponible, de récupérer les résultats des projets antérieurs.

Le second exemple traite de la sélection de matériaux et de traitements thermiques dans le but de satisfaire un objectif de coût minimum [AME01]. Cette étude montre que la stratégie de sélection par analogie permet à l'entreprise de gagner beaucoup de temps en favorisant la réutilisation du savoir-faire. Néanmoins les auteurs de l'étude soulignent que la principale difficulté de cette approche est liée à la construction de la base de connaissance et à sa mise à jour régulière.

Les outils de sélection par analogie sont donc particulièrement indiqués lorsque le domaine d'application possède de fortes spécificités. La force de cette approche est d'exploiter la connaissance acquise dans le temps [LIA03]. La contrepartie de cette approche est qu'elle nécessite un effort considérable pour capitaliser le savoir spécifique de l'entreprise et que par ailleurs elle n'offre pas toujours une ouverture directe vers de nouvelles solutions en termes de matériaux et de procédés.

Stratégie par recherche libre

La recherche libre, ou à requêtes ouvertes, est une stratégie de sélection des matériaux et des procédés de mise en œuvre utilisée dans de nombreux domaines de conception aussi variés que la micro-électromécanique [GUI07] ou la conception de système mécanique avec prise en compte de l'impact environnemental [GIU05]. L'information technique, économique ou environnementale sur les matériaux et les procédés de mise en œuvre est contenue dans une base de données généraliste. Le potentiel d'innovation se trouve à ce niveau car le concepteur dispose

d'une mine d'informations sur les matériaux et les procédés. Le travail du concepteur consiste à traduire le besoin en termes d'attributs caractéristiques des matériaux et des procédés de mise en œuvre pour effectuer une sélection.

Le point critique de cette méthode est donc, comme précédemment, la base de connaissance. Comme l'illustre la Figure 2-5, la hiérarchisation des données permet de progresser dans la conception en augmentant progressivement le niveau de détail. Cette structure permet d'exploiter les informations autant à l'étape préliminaire de la conception lorsque l'on cherche à identifier les classes de matériaux acceptables, qu'à un stade de conception de détail lorsque l'on s'intéresse au choix des fournisseurs.

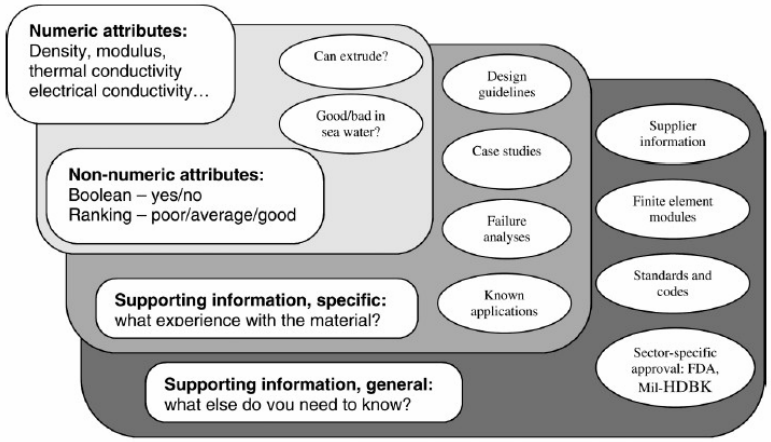


Figure 2-5 : Hiérarchisation des données matériaux. Source : [ASH04]

Néanmoins toutes les informations sur un procédé de fabrication ou sur un matériau ne peuvent pas être incorporées dans de telles bases de données, généralistes par nature. Par exemple, le critère de sélection d'une solution peut se faire sur des attributs plus difficilement classifiables tels que l'effort de qualification nécessaire en vue d'une mise sur le marché. L'approche par recherche libre doit donc se limiter à une traduction simplifiée du problème de conception et cela peut rester suffisant à une étape de conception préliminaire. Aux étapes ultérieures de conception, le concepteur doit vérifier ses choix en complétant l'analyse par des critères propres à son domaine d'activité.

Les deux stratégies de sélection des matériaux et procédés présentées ici nécessitent la création de base de connaissance de natures différentes. Cette présentation rapide confirme leurs capacités à proposer des solutions innovantes. Toutefois, nous possédons un faible recul sur les conceptions multimatériaux pouvant servir de cas de référence. Notant que l'efficacité d'une stratégie par analogie nécessite une base de connaissance particulièrement fournie [MEJ01], il

n'est pas envisageable de suivre une telle approche. Notre choix se tourne naturellement vers la stratégie de sélection à requêtes ouvertes, qui rappelons-le, possède un fort potentiel d'innovation.

2.2.2 Outils de sélection de type « recherche libre »

Le paragraphe précédent a présenté différentes stratégies de sélection de matériaux et de procédés. Nous avons conclu que la stratégie par « recherche libre » était envisageable dans notre cas. L'objectif de ce paragraphe vise à présenter deux exemples de méthodes basées sur cette approche. Loin d'être exhaustifs et totalement représentatifs, ces exemples de méthodes, au caractère plus applicable pour un concepteur qu'une « simple » stratégie, vont permettre d'introduire certains points clefs qui seront traités plus loin dans ce document.

WiseProM

WiseProM [GUP03] est un outil de SMP, destiné à être utilisé en phase de conception préliminaire. Cet outil considère en parallèle le choix de matériau et de procédé de mise en œuvre. Le but d'un tel outil est de fournir au concepteur un moyen de considérer un grand nombre d'information pour le conduire vers le choix d'une combinaison matériau-procédés. L'utilisation de l'informatique est essentielle en raison des possibilités de stockage et d'analyse de nombreuses informations et combinaisons. Le principe de l'outil repose sur la lecture de bases de données, le tri et le classement des solutions potentielles. D'après l'auteur, le terme « solution » renvoie aux couples matériau-procédés issus de la sélection. Pour lire les bases de données, l'auteur propose de hiérarchiser les informations sur les matériaux et sur les procédés. Le tri des solutions s'appuie sur la validation de la compatibilité entre les matériaux et les procédés Figure 2-6.

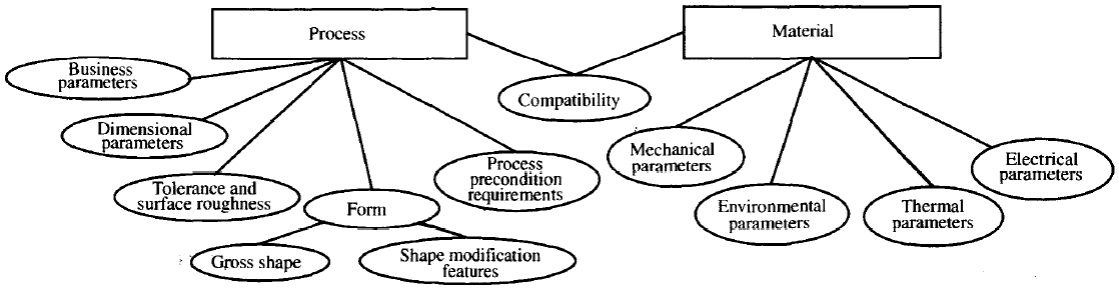


Figure 2-6 : Représentation de l'information sur les matériaux et les procédés [GUP03]

La première étape de la méthode a pour but de générer les combinaisons de matériaux et de procédés qui satisfont un ensemble de requêtes définies en amont par le concepteur. Ces

requêtes portent sur les domaines de propriétés des matériaux (masse volumique entre 3 et 6 kg/m^3 par exemple) et sur les caractéristiques générales des procédés (petite ou grande série par exemple). L'auteur a développé un algorithme qui permet de vérifier la compatibilité entre les matériaux et les procédés. A l'issue de la première étape, le concepteur dispose de solutions potentielles qui ne sont pas encore exploitables. Il faut passer la deuxième étape qui invite l'utilisateur à préciser son cahier des charges, notamment en termes de dimensions et de tolérances. Un autre algorithme permet alors de construire la séquence de procédé permettant de conduire au produit fini. Cette opération est réalisée en vérifiant la compatibilité entre les procédés. La troisième et dernière étape consiste à estimer le coût des séquences de procédés retenues pour en extraire la combinaison matériau-procédés la plus performante. L'estimation du coût d'une solution est une difficulté de la phase de conception et les auteurs de WiseProM proposent d'évaluer des intervalles de coût en analysant la dépendance des paramètres d'entrée sur la fonction coût.

Cet outil de sélection est dans l'esprit de l'ingénierie concourante. Ce type d'outil offre l'opportunité de considérer un très grand nombre d'options grâce aux algorithmes exploratoires intégrés dans ses différents modules. L'intérêt d'une telle approche est que l'utilisateur peut gérer facilement l'imprécision du cahier des charges inhérente aux premières phases de conception. Cet outil permet, de façon très pragmatique, de créer un lien direct entre le besoin et le coût, facilitant ainsi l'étape de sélection basée sur la validation de la compatibilité entre les matériaux et les procédés. Pour aider à la sélection, les différents attributs des deux composantes matériaux et procédés sont hiérarchisés, allant du général au particulier. Le processus de sélection étant itératif, le concepteur passe en revue les différentes solutions possibles et, à mesure que le projet avance, le concepteur considère les nuances de matériaux et de procédés de façon à affiner le choix. Un autre intérêt pour l'utilisateur est qu'il va être capable de faire une sélection sur des matériaux et des procédés dont il n'a pas la pratique. Il élargit le spectre de la recherche et donne plus de chance au projet de proposer une solution performante et innovante. Cependant, une limite de cette approche est qu'elle ne propose pas de recommandations au concepteur si le système ne trouve pas de combinaison matériau-procédés convenable à l'issue de la procédure.

Cambridge Engineering Selector

Cambridge Engineering Selector (http://www.grantadesign.com/) est un outil commercial de sélection de matériaux et de procédés de mise en œuvre. Le cœur du système tient dans l'information contenue dans les bases de données : 2850 références de matériaux avec 60 attributs (économiques, physiques) et 230 procédés de fabrication. Le logiciel propose une interface qui

permet de tracer des cartes graphiques de sélection de matériaux et de procédés.

La stratégie de sélection repose quant à elle sur la méthode d'Ashby qui guide l'utilisateur à travers les trois étapes de filtrage, de classification et de documentation.

Le travail de l'utilisateur est déterminant dans cette approche car son rôle consiste à traduire le cahier des charges fonctionnel et à imposer les critères de conception pour effectuer le choix de matériau. Suivant la méthode d'Ashby, synthétisée sur la partie gauche de la Figure 2-7, le concepteur est invité à formaliser le problème de conception suivant une métrique définissant la performance de la solution. Il s'appuie ici sur des modèles de comportement nécessairement simples à une étape préliminaire de la conception. C'est à cette étape qu'interviennent les notions d'objectif, d'astreintes de conception et d'indice de performance pour lesquelles nous consacrerons un paragraphe dans un chapitre ultérieur.

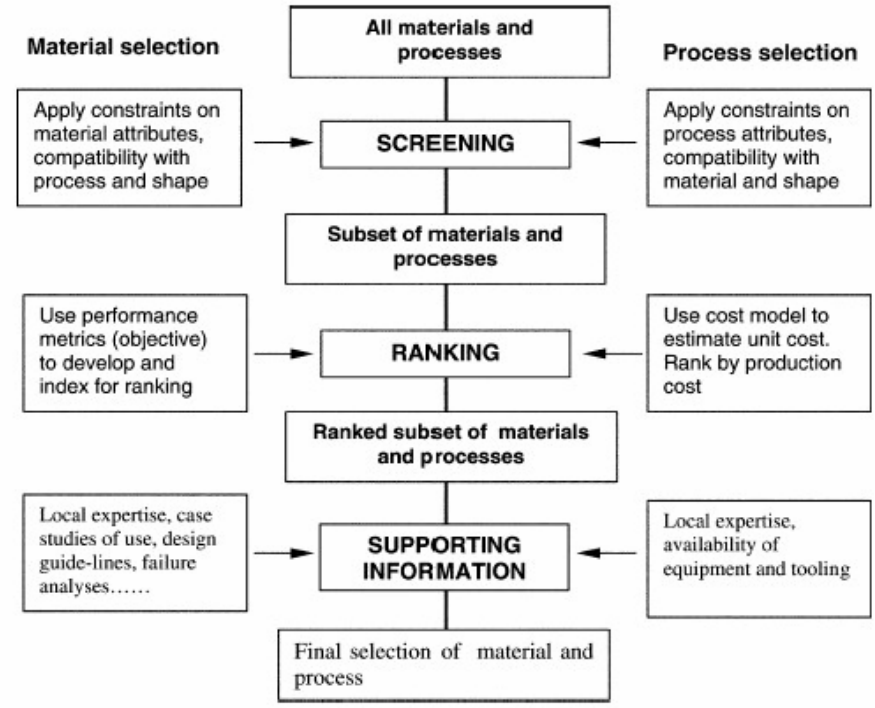


Figure 2-7 : Etapes de sélection des matériaux et des procédés selon Ashby [ASH99]

Après cette étape de traduction du cahier des charges fonctionnel, la démarche consiste à filtrer la base de données sur des attributs matériaux, permettant ainsi d'écarter les éléments de la base non compatibles avec le cahier des charges. Ensuite, la sélection s'effectue par classement des matériaux restants via la fonction performance mesurant la qualité d'un matériau vis-à-vis de l'objectif. L'étape ultime de documentation consiste à renseigner les solutions avec des attributs propres à chaque solution pouvant aider le concepteur à finaliser la procédure de choix.

La sélection des procédés de mise en œuvre s'effectue de façon analogue (voir partie droite

de la Figure 2-7). On dispose d'une base de données des procédés de mise en œuvre, structurée et hiérarchisée en attributs comparables d'un procédé à l'autre assurant ainsi la progression par complexité croissante dans le processus de décision.

Cette méthode ouvre la voie vers la résolution d'un grand nombre de situations parfois complexes que peut rencontrer une équipe de conception. Pour donner un exemple d'utilisation de la méthode, des chercheurs de l'Université d'Alberta aux Etats-Unis ont appliqué cette méthode pour concevoir la combinaison d'astronautes qui auraient pour mission d'explorer l'atmosphère de Mars [MAR04].

L'intérêt d'une telle démarche est qu'elle permet d'effectuer une sélection de matériaux et de procédés de mise en œuvre sur tous types de conception de pièce. Une fois la fonction performance établie, la procédure de sélection est largement facilitée par les cartes de sélection graphique et la définition d'indices de performance. Ce type de procédure offre également l'opportunité de découvrir de nouvelles applications d'un procédé de fabrication ou d'un matériau, le potentiel d'innovation est donc un point fort de la méthode.

Une des limites de cet outil est qu'il ne propose que pas de démarches lors de l'échec de la procédure de sélection où, typiquement, il n'existe pas de solutions satisfaisant le cahier des charges fonctionnel.

2.2.3 Synthèse

Ce chapitre a présenté rapidement des stratégies et quelques outils de sélection de matériaux et de procédés de mise en œuvre permettant de guider le concepteur tant en phase de conception préliminaire qu'à un stade plus avancé. On retient que le support d'aide à la décision pour la sélection de matériaux en conception préliminaire est un outil qui

1- propose un mode d'interprétation du cahier des charges fonctionnel ;
2- utilise les informations de la base de données permettant de réaliser des choix ;
3- propose une procédure permettant de sélectionner et ordonner les candidats potentiels.

Le choix d'une stratégie de sélection de matériaux et de procédés dépend du contexte de conception dans lequel on se trouve. Il faut également considérer l'effort nécessaire pour mettre en place la base de connaissance nécessaire au déploiement de la méthode car sans ces informations, le concepteur ne dispose pas d'éléments pour prendre de décisions.

Les outils présentés dans ce chapitre permettent de faire face à un grand nombre de situation de conception. La question est alors de savoir quelle démarche adopter lorsqu'à l'issue de la procédure il n'y a aucune solution satisfaisante. Ce type de situation a été étudié par le passé et nous proposons d'analyser l'état des recherches dans ce domaine dans le prochain paragraphe.

2.3 CONCEPTION DES MULTIMATERIAUX

Au cours du processus de conception, il est nécessaire d'effectuer des choix. Dès lors qu'un principe de solution a été choisi, on définit une forme pour l'objet et on peut passer à la sélection des matériaux et des procédés de mise en œuvre. Les critères de choix sont établis sur la base d'une analyse fonctionnelle qui traduit le besoin fondamental en fonctions. On a vu les démarches de sélection et quelques outils associés permettant d'aider le concepteur dans sa tâche. Parfois, selon le besoin, ces procédures ne peuvent pas aboutir. Il est nécessaire de proposer des alternatives de conception : les multimatériaux font partie de ces options envisageables. Ce paragraphe propose de revenir sur la notion de multimatériau, d'analyser certaines démarches dédiées à la conception des multimatériaux et de dégager quelques principes qui permettent de conduire la conception de ce type de produits.

2.3.1 Qu'est-ce qu'un multimatériau ?

Un multimatériau signifie littéralement « plusieurs matériaux ». Ce terme, relativement récent, regroupe un très grand nombre de concepts plus ou moins proches avec parmi les plus connus : les matériaux composites (matrice renforcée comme les composites à fibres longues et matrice organique, les composites à matrice métallique mais également le béton hydraulique ou polymère), les nanomatériaux, les matériaux en couche comme les panneaux sandwich. Les trois exemples suivants montrent certains spécimens représentatifs du concept de multimatériaux.

La Figure 2-8 présente le cas d'un absorbeur d'énergie constitué de la combinaison de métal et de composite à matrice organique renforcé de fibres. Si chaque constituant apporte une réponse en termes de dissipation d'énergie, la combinaison permet d'améliorer la performance de la pièce. En fait, les mécanismes mis en jeu découlent de la capacité du composite à absorber l'énergie par de multiples ruptures au niveau local tandis que le métal dissipe de l'énergie par déformation plastique et maintient l'intégrité de la structure après l'impact.

Figure 2-8 : Absorbeur d'énergie (Source www.tudelft.nl)

La Figure 2-9 représente une vue tridimensionnelle de la paroi du vêtement pour astronaute composé de plusieurs couches de matériaux. Les composantes essentielles de cette paroi assurent des fonctions de refroidissement par circulation d'un liquide, de tenue à la pression et des fonctions de protection thermomécanique. Après une revue des solutions existantes, la conception a consisté à proposer des architectures alternatives et un choix de matériaux conduisant à une solution multimatériaux alternative. L'optimisation de chaque couche a porté sur la réduction de poids et l'amélioration de la mobilité de l'astronaute.

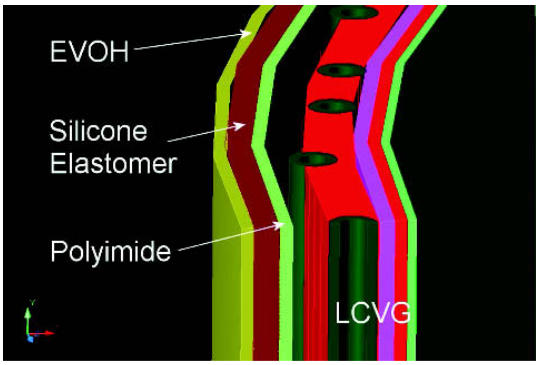


Figure 2-9 : Vêtement pour astronaute [MAR04]

Le troisième exemple présenté en Figure 2-10 est un tube flexible utilisé dans les applications offshores. Après une sélection de matériau réalisée en affectant une fonction par couche (tenue à la pression, étanchéité, résistance à l'effondrement, isolation thermique, résistance aux fluides transportés), le dimensionnement tient compte de couplages qui peuvent exister entre les couches et des possibilités offertes par les méthodes de mise en œuvre. Le résultat conduit à une structure multicouche, de polymère et de métal, qui ne sont pas intimement liées, assurant ainsi la flexibilité de l'ensemble.

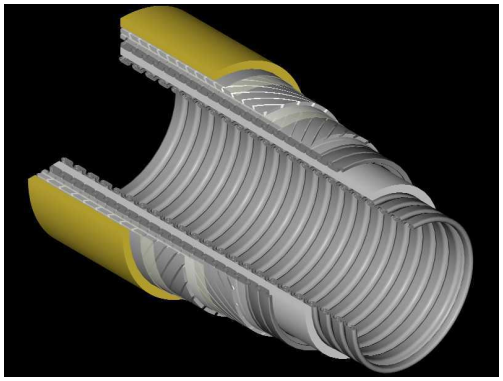


Figure 2-10 : Tube Flexible

On constate que les multimatériaux combinent des constituants de toutes classes : métaux,

céramiques ou polymères (Figure 2-11). Ils constituent donc une classe hybride ce qui donne aux multimatériaux leur caractère si particulier, et du fait de leur complexité, ils génèrent des difficultés évidentes pour réaliser des choix de conception. En effet, la performance du multimatériau dépend de la nature des constituants, de leur arrangement et de leur proportion. Il existe donc une infinité de solutions potentielles et le choix de la solution optimale peut nécessiter le passage par une revue détaillée de l'espace des solutions.

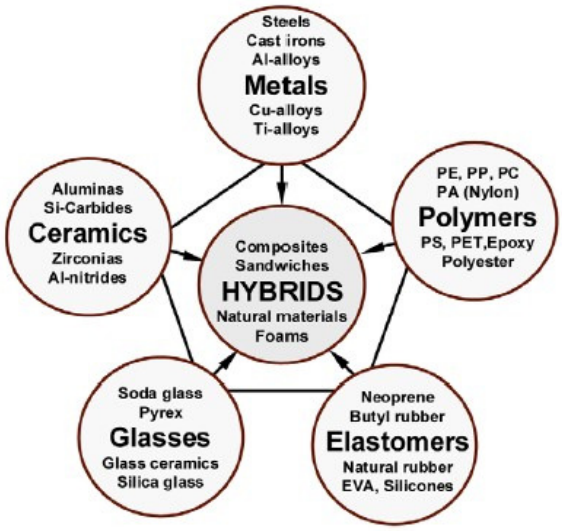


Figure 2-11 : Les matériaux hybrides combinent les propriétés de plusieurs matériaux. La performance du matériau résultant dépend également de la géométrie d'ensemble de la combinaison mais également des interactions entre constituants. Source : [ASH03]

A l'issue de ces illustrations, on peut rappeler quelques définitions du concept de multimatériau proposées dans la littérature.

Selon Kromm [KRO02], un multimatériau est « *une combinaison non homogénéisable et non démontable de matériaux permettant par ailleurs la définition de propriétés comme il pourrait être fait pour un matériau homogénéisable* ».

Castillo [CAS04] complète cette définition en précisant que la « *définition d'un multimatériau exige la sélection des constituants, leur architecture et leur fraction volumique, la sélection de la morphologie de la combinaison et la définition d'un procédé de mise en œuvre* ».

Enfin, selon Ashby et Bréchet [ASH03], un multimatériau ou matériau hybride est une « *combinaison de deux matériaux ou plus, caractérisée par une échelle de combinaison prédéfinie et une géométrie de combinaison prédéterminée* ». Ils introduisent la notion d'espace de matériaux où les caractéristiques intrinsèques des matériaux correspondent à des dimensions, ce qui donne naissance à des hyper espaces de matériaux. Selon cette approche, les matériaux hybrides comblent un vide laissé par les matériaux existant à l'état monolithique.

2.3.2 Aide à la conception de multimatériaux

Après avoir introduit la notion de multimatériaux, on mesure mieux l'étendue des possibilités offertes à un concepteur. C'est une voie intéressante à explorer lorsqu'on ne trouve pas de solutions en utilisant les matériaux traditionnels tels que les céramiques, les métaux et leurs alliages ou encore les polymères et les élastomères. Mais pour soutenir cette démarche, il apparaît le besoin de développer des approches particulières. C'est ce que l'on regroupe ici sous le terme général de *méthode d'aide à la conception de multimatériaux*. Devant la diversité des problèmes à traiter, les chercheurs n'ont pas eu d'autre choix que de développer des approches spécifiques, partant d'exemples typiques ils ont cherché à construire des méthodes de conception adaptées et pour ensuite être généralisées. On présente ici quelques exemples de ces travaux.

Conception de matériaux composites à matrice organique

Ces matériaux sont des arrangements de fibres, continues ou non, d'un matériau résistant (le renfort), noyé dans une matrice organique dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible [GAY05]. La matrice garantit la disposition géométrique du renfort et transfère aux fibres les sollicitations auxquelles est soumise la pièce.

Comme le rappellent Guillemot et Grunevald [GUI00] sur l'exemple de l'industrie ferroviaire, la difficulté de conception se trouve dans la détermination des attributs caractéristiques du matériau composite : la nature des constituants (le renfort et la matrice), l'architecture du renfort, la liaison entre constituants, la fraction de matériau de renfort et le procédé de fabrication. Par conséquent, la multiplication des options de choix pose un problème récurrent en conception composite, il faut être capable de faire un choix simultané de tous les attributs caractéristiques du futur matériau en tentant de retenir les solutions qui répondent le plus favorablement aux critères et objectifs fixés dans le cahier des charges.

Le problème de la sélection des constituants d'un matériau composite a été abordé par Ashby [ASH93]. La démarche proposée considère les matériaux composites dont l'échelle du renfort est large devant celle de sa microstructure, de sorte que les propriétés macroscopiques dérivent directement des propriétés de chacun des constituants. Il propose alors des modèles de micromécaniques qui permettent d'estimer une propriété caractéristique du matériau composite dépendant, entre autres, de la fraction volumique de chacun des constituants. Ces modèles définissent des caractéristiques *frontières* qui, selon certaines hypothèses, permettent d'encadrer les propriétés du composite quelle que soit son architecture (par exemple, les modèles série et parallèle pour le module d'élasticité). En associant les indices de performance (mesure de la capacité d'un matériau à assurer une fonction donnée) et les cartes de sélection (basées sur une

représentation graphique des propriétés des matériaux), il propose une démarche qui permet d'identifier les constituants d'un matériau composite. Un des principaux atouts de cette démarche est que le concepteur s'affranchit de la définition de l'architecture du multimatériau pour se concentrer essentiellement sur la sélection des constituants. Cette approche est donc adaptée à une phase préliminaire de la conception dont l'issue est surtout d'estimer la faisabilité d'une ou plusieurs combinaisons.

Dans leur ouvrage sur la sélection des matériaux Bréchet, Ashby et Salvot [ASH01] mettent en évidence que cette approche ne permet pas de prendre en compte les problèmes multicritères, la compatibilité entre les constituants et le choix du procédé de mise en œuvre, les auteurs ont alors proposé une seconde approche basée sur les algorithmes génétiques. L'usage d'une telle technique est adapté à la résolution de problèmes multicritères pour lesquels on ne dispose pas de fonction d'évaluation de la solution, ou bien lorsque l'espace des solutions est trop étendu et impliquerait des temps de calcul trop importants pour déterminer la solution optimale. Cette technique permet de proposer une solution répondant aux critères du cahier des charges. Néanmoins, elle n'offre pas la possibilité de vérifier l'existence d'autres solutions pouvant être plus performantes, même après un nombre important de générations.

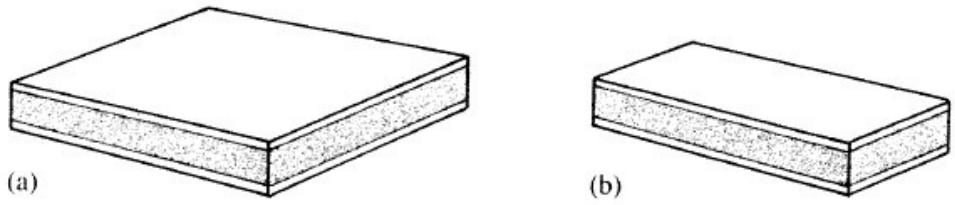
La méthode proposée par Monroy, Skordos et Sutcliffe [MON08] s'applique à la conception de matériaux composites stratifiés et peut se classer dans le domaine des méthodes d'optimisation. Cette méthode se déroule en trois phases. D'abord le concepteur procède à l'analyse du problème de conception en identifiant les contraintes et les objectifs à atteindre. Par ailleurs, il fixe quelques contraintes supplémentaires au futur stratifié : cela consiste à réduire le problème en limitant l'analyse à des orientations et des quantités de plis prédéfinis. Ensuite, il applique la méthode des éléments finis pour procéder à l'analyse systématique des composites définis à la phase précédente. Les combinaisons acceptables sont conservées si les critères de conception sont satisfaits. Ces solutions sont enregistrées et on peut procéder au classement au cours d'une dernière phase. Cette approche met en évidence qu'au cours de la conception de matériaux composite à matrice organique, et plus généralement de multimatériau, il peut être nécessaire d'encadrer les variables de conception. Cette étape, réalisée aux premières phases de la conception, permet de réduire le champ d'investigation aux solutions les plus probables.

Ces processus de conception intègrent la sélection des constituants et le choix de l'architecture ce qui offre une grande flexibilité au concepteur de proposer une solution performante. Cependant, Vizzini met en évidence l'importance de l'interaction entre la fabrication et les caractéristiques finales du matériau composite [VIZ01] : un risque majeur est, à ce titre, de concevoir une pièce certes performante mais dont le coût de fabrication est démesuré.

Dans ce contexte, l'auteur souligne la nécessité d'établir des approches spécifiques qui permettent de coordonner les activités de conception de la structure et la recherche d'un moyen de fabrication. Suivant l'ordre chronologique de la fabrication d'une pièce, il dresse une structure à trois niveaux qui pourrait être exploitée comme un guide d'aide à la conception de matériaux composites à matrice organique. Le premier niveau traite des contraintes de préparation du moule et de la manipulation des constituants du matériau composite. Dans un deuxième niveau, le concepteur pourra aborder les relations existant entre les procédés de fabrication et les performances attendues. A ce niveau, on peut hiérarchiser les procédés de fabrication en séparant les procédés dits manuels, semi automatiques et les procédés par moulage. Un troisième niveau traite des aspects de post fabrication tels que l'usinage ou l'assemblage. Il conclut que pour mettre en place de telles approches, il est nécessaire de rassembler une équipe d'experts pour pouvoir traiter simultanément les aspects matériaux, de conception mécanique et de procédés de fabrication.

Conception de structure sandwich

Les sandwichs sont des multimatériaux très présents dans les secteurs tels que l'aéronautique, la construction navale, le bâtiment ou la fourniture d'équipement sportif. Un sandwich est, selon une terminologie très répandue, constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux, un matériau d'âme, de faible densité, pris en sandwich par un matériau de peau, ayant généralement de meilleures propriétés mécaniques. Cet arrangement singulier de matériaux confère à l'ensemble une très bonne raideur spécifique en flexion. Il faut toutefois veiller au respect de certains critères de dimensionnement tels que la résistance au flambement ou la décohésion peau-âme. On trouvera dans l'ouvrage de Zenkert, un support pour l'analyse théorique et le dimensionnement de structure sandwich [ZEN95].



(a) Plaque, (b) poutre.

Figure 2-12 : Multimatériau de type sandwich. Extrait de [ASH01]

La sélection des matériaux constituant une structure sandwich prend en compte de nombreux critères comme la raideur ou la résistance en flexion. Pour concevoir un sandwich, il

faut effectuer un choix simultané d'au moins deux constituants et de leurs épaisseurs respectives. Il y a a priori une infinité de solutions potentielles.

En utilisant le formalisme de la méthode de sélection des matériaux proposées par Ashby, Bréchet et Salvo [ASH01], dont certaines notions seront rappelées au chapitre 3, les auteurs montrent qu'une sélection monocritère d'un multimatériau de type sandwich peut être opérée de façon directe. Il n'existe cependant pas de méthode directe pour traiter un cas multicritère car pour chaque indice de performance, il faut pouvoir optimiser à la fois les dimensions et le choix de matériaux. Ce constat introduit alors un point délicat de la conception de multimatériaux que l'on ne rencontrait pas en conception de pièces utilisant un seul matériau. Pour ces derniers en effet, il est possible de supprimer du problème les variables géométriques et les requêtes fonctionnelles. L'avantage était que le concepteur pouvait, de façon directe, filtrer, comparer, trier et sélectionner les meilleurs candidats. Dans le cas des multimatériaux, cette méthode ne peut être directement exploitée que dans le cas de conception monocritère. Lorsque plusieurs astreintes de conception sont imposées par le cahier des charges, les données géométriques et fonctionnelles se mêlent aux informations sur les matériaux et la méthode de sélection exploitant les indices de performance atteint ses limites.

Une voie intermédiaire de résolution consiste à traiter des cas particuliers, comme par exemple, fixer une partie de la géométrie pour effectuer la sélection des constituants ou encore, contraindre la conception vers un choix de matériau pour ensuite optimiser la forme de la structure. La littérature traite ces problèmes multicritères en particulier pour le choix optimal des épaisseurs d'un tube dont la paroi est constituée d'un sandwich [MIN00], [OST96], [XIA00]. Ces approches permettent d'exploiter des méthodes de résolutions directes, plus faciles à utiliser dans un contexte de recherche préliminaire.

Une dernière voie consiste à utiliser un outil tel que les algorithmes génétiques pour résoudre un problème d'optimisation multicritère [ASH03], [DEO99]. Au travers de ces études, on constate que le choix d'une configuration optimale (vis-à-vis de la masse) peut-être opéré en considérant des différents critères mécaniques (raideur et résistance) et thermique (isolation).

Ces travaux sont basés sur la connaissance préalable de l'architecture du multimatériau. La construction sandwich considérée est classique car il s'agit d'un empilement de trois couches : deux peaux et une âme. Or, le choix de l'architecture optimale peut varier en fonction du besoin. La démonstration a été réalisée dans une étude sur des poutres caisson sandwich sollicitées en flexion trois points [MAI07]: partant de plusieurs architectures prédéfinies, l'auteur a cherché à montrer que l'on pouvait comparer la performance des différentes architectures pour lesquelles on cherchait à diminuer la masse. Toujours dans le cadre de la recherche d'architecture, on peut

citer les travaux de Torquato portant sur l'optimisation topologique [TOR00]. L'auteur rappelait que le problème d'optimisation topologique consiste à rechercher la distribution optimale d'un motif matériau dans un domaine de telle façon qu'une fonction « objectif » soit optimisée tout en garantissant le respect d'un certain nombre de contraintes.

Conception de structures particulières

a) Réservoir de transport de matière énergétique.

Ce type de réservoir doit permettre le transport de matière énergétique en protégeant le liquide contenu et en préservant l'environnement en cas d'accident. Les contraintes imposées dans le cahier des charges sont multiples (résistance mécanique, résistance au choc, limitation de l'onde de choc en cas d'impact, déconfinement du liquide en cas d'incendie). Une pré-étude du système a conclu sur l'impossibilité de trouver un matériau de paroi qui puisse satisfaire simultanément l'ensemble des requêtes fonctionnelles. Dans ce contexte, l'étude a consisté à produire une méthode de conception de multimatériau [KRO02].

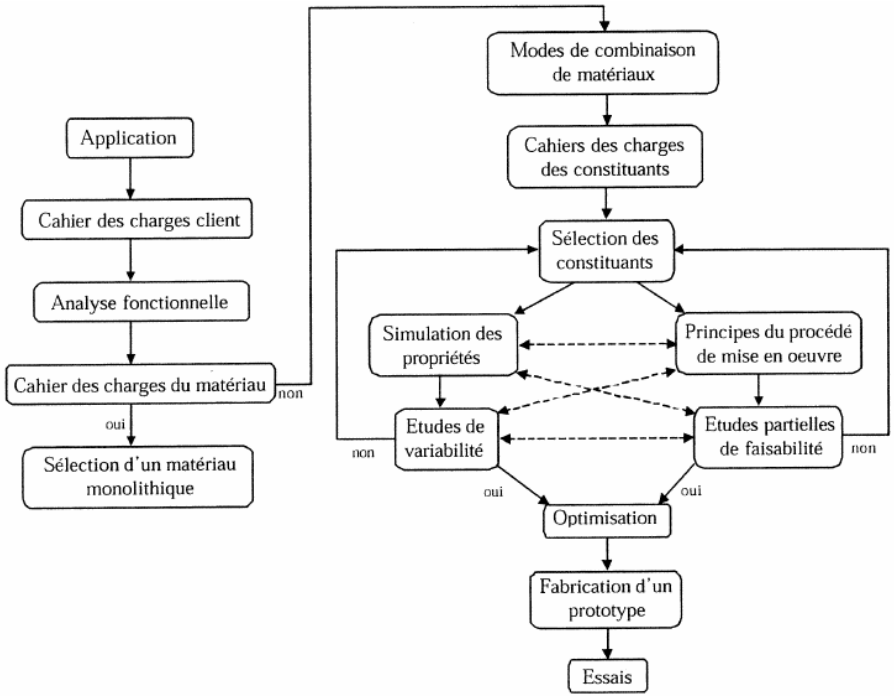


Figure 2-13 : Synthèse de la démarche de conception de multimatériau proposée par [KRO02]

La démarche consiste à rechercher des mécanismes fonctionnels et/ou de couplage qui permettent de satisfaire certaines fonctions du cahier des charges. Ces couplages thermomécanique et thermochimique conditionnent alors un choix d'architecture. Une fois ce choix réalisé, il faut établir plusieurs cahiers des charges matériau permettant de réaliser le

mécanisme et par voie de conséquence, la fonction du cahier des charges. L'ensemble des mécanismes peut faire l'objet de recherches de matériau mais certaines propositions peuvent être écartées à ce stade de la conception pour des questions de mise en œuvre. Le concepteur disposant d'un cahier des charges pour chaque constituant du multimatériau, la suite de la démarche consiste à sélectionner les constituants du multimatériau et à valider, par l'intermédiaire d'un dimensionnement, la satisfaction du cahier des charges fonctionnel. L'étude s'est poursuivie par la validation expérimentale du comportement du réservoir avec en particulier l'analyse des mécanismes sélectionnés en vue de la mise au point d'un procédé de fabrication industriel.

Cette méthode est une réponse au problème de conception puisqu'une solution multimatériau a été trouvée alors que le concepteur se trouvait dans une impasse avec les matériaux traditionnels. Un apport important de cette étude réside dans la mise en place d'une phase de recherche de mécanismes qui conduit à proposer une nouvelle architecture de la paroi du réservoir. Le résultat de cette phase repose en grande partie sur la réunion des compétences techniques de l'équipe de conception.

Cette étude a mis en avant les caractéristiques fondamentales des multimatériaux : l'association de deux ou plusieurs constituants, ayant une géométrie d'association particulière et une échelle prédéterminée de combinaison.

b) Amélioration du comportement d'un bâti de machine outil.

La conception d'un bâti de rectifieuse est un cas d'étude intéressant à plusieurs titres. Castillo montre que les critères de conception à prendre en compte sont très diversifiés (astreintes thermomécaniques, stabilité dynamique, équilibre économique, impact environnemental de la fabrication) [CAS04]. Les matériaux traditionnellement utilisés pour construire ces structures sont la fonte et le béton hydraulique mais ces solutions ont des performances limitées. Dans ce cadre, l'auteur a cherché à améliorer les performances du béton hydraulique.

Les concepteurs doivent faire un choix de matériaux sur un ensemble complexe d'astreintes. Une autre difficulté de ce problème est qu'il n'existe pas a priori de relation directe permettant d'évaluer simplement la performance d'une solution. Enfin, la recherche simultanée d'un procédé de fabrication est une composante importante de l'activité de conception de multimatériau.

Après une étude des paramètres dynamiques et thermomécaniques du problème de conception du bâti, Castillo a proposé une démarche originale qui couple les plans d'expériences et la modélisation par éléments finis. Cette démarche autorise la définition d'indices de performance alors qu'aucune relation analytique n'était disponible. Cette première étape constitue

une généralisation possible des travaux antérieurs menés par Ashby sur l'utilisation des indices de performances dans les procédures de sélection des matériaux.

Ensuite Castillo a montré qu'il existait des incompatibilités entre les différentes fonctions du cahier des charges. Si l'on considère simultanément les exigences thermomécaniques et dynamiques, on s'aperçoit qu'il n'existe que très peu de solutions de telle sorte que seul le béton hydraulique permet d'améliorer le choix initial de la fonte, mais dans des proportions toujours insuffisantes du fait de sa faible stabilité dimensionnelle, des délais importants de fabrication, et de la faible résistance aux fluides de coupe. Après un choix d'architecture (matrice renforcée), la démarche adoptée par Castillo conduit à l'établissement d'un nouveau cahier des charges spécifique à chaque constituant : les renforts et la matrice. Par application des critères de sélection, le béton hydraulique a été écarté au profit du béton polymère après avoir vérifié que le comportement théorique de cette association entre les constituants était viable.

La méthode se poursuit par la vérification expérimentale des lois de comportement issues de la modélisation, permettant d'ajuster le choix des constituants (nature, proportion, architecture) et d'effectuer une première validation du procédé de fabrication.

Cette démarche a été synthétisée dans l'organigramme suivant (voir Figure 2-14) et souligne le caractère itératif de la démarche de conception. Il y a en effet des échanges entre la phase de sélection des constituants et la phase de mise au point du procédé de fabrication.

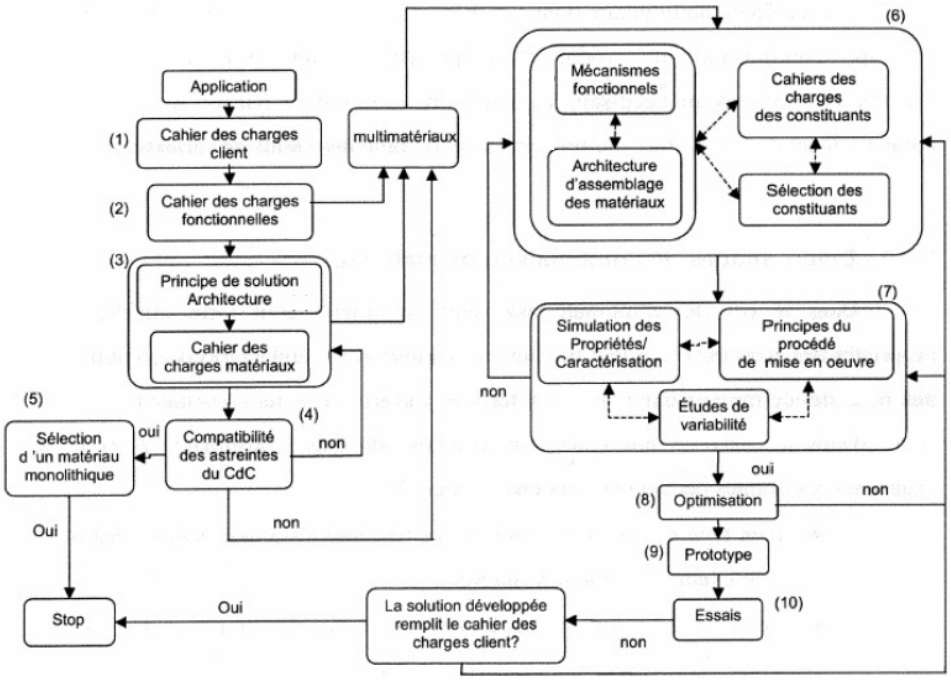


Figure 2-14 : Organigramme de conception de multimatériau selon Castillo [CAS04]

Dimensionnement : modèles de comportement

Au-delà des aspects liés aux méthodes de conception, il est nécessaire de souligner l'apport des études orientées vers l'étude du comportement des multimatériaux, établies dans des conditions d'environnement données, selon un mode d'élaboration particulier. On pourra par exemple se référer aux travaux de Tsai [TSA80], Hashin [HAS70] ou Zenkert [ZEN95], qui ont, par leurs contributions respectives, permis de poser certaines bases théoriques nécessaires à la modélisation. Ce travail de fond couvre une part importante de notre connaissance actuelle de ces matériaux atypiques. Nous ne les abordons pas directement ici mais il faut souligner qu'ils permettent aujourd'hui de disposer de modèles qui offrent des moyens de prédiction du comportement de pièces multimatériaux.

2.3.3 Synthèse

La conception des multimatériaux est un domaine d'étude récent, et les efforts pour permettre aux concepteurs de proposer des solutions de ce type passent non seulement par la compréhension des phénomènes régissant le comportement de ces matériaux atypiques mais également par la mise en place de méthodes et d'outils de conception adaptés aux différentes situations de conception rencontrées dans l'industrie.

Toutes les situations de conception ne conduisent pas vers un choix de multimatériaux. Les études citées dans ce chapitre montrent que ce choix peut être motivé par le fait que les solutions monolithiques ne permettent pas de répondre favorablement au cahier des charges fonctionnel. Certains cahiers des charges peuvent conduire à cette situation, parmi lesquelles on peut citer l'amélioration de la performance d'une solution existante, l'ajout de fonctionnalités ou la diminution des coûts d'élaboration.

La conception de produits monolithiques et multimatériaux doit s'envisager de façon différente. En conception multimatériaux, le nombre de paramètres caractéristiques à déterminer est plus important que lors de la conception d'un produit monolithique. En particulier, il faut connaître chacun des constituants et définir leur combinaison. Enfin, comme pour les matériaux monolithiques, les propriétés d'un multimatériau sont intimement liées au procédé de fabrication, ainsi le choix du mode de mise en œuvre fait partie intégrante du processus de conception.

Par conséquent, les outils et les méthodes dédiés à la conception de produits monolithiques ne sont pas directement applicables lorsque l'on souhaite développer une solution multimatériaux. Les travaux présentés dans ce chapitre donnent un aperçu des difficultés auxquelles un concepteur peut être confronté dans cette situation :

- sélection simultanée des constituants, de leur proportion, d'une architecture et

d'une échelle de combinaison,

- recherche des mécanismes de couplage,
- gestion de la compatibilité des fonctions du cahier des charges,
- gestion des problèmes multicritères,
- existence d'une infinité de solutions potentielles,
- nécessité d'une procédure de choix objective.

Notre travail approche le thème des multimatériaux sous le volet méthodologie de conception. Suivant l'idée qu'une seule et unique méthode ne peut supporter toutes les conceptions, il semble nécessaire de rechercher une méthode spécifique au problème industriel de conception.

2.4 CONCLUSION ET ORIENTATION DU TRAVAIL

Dans ce chapitre, nous avons abordé successivement l'activité de conception, puis les méthodes et les outils de sélection de matériaux, et enfin la conception de multimatériaux.

La conception est décrite comme une activité d'ingénierie dont le but est de répondre par une solution technique à un besoin plus ou moins bien formulé. A l'étape préliminaire de conception, on constate que les choix des ingénieurs sont décisifs car ils engagent la viabilité économique du projet. Travailler avec méthode en identifiant systématiquement les décisions subjectives permet de contrôler le processus. Une méthode de conception n'apporte pas de solution au problème : c'est un cadre favorisant l'aide à la décision.

Le produit de la conception évolue en fonction de l'étape considérée. Au début du processus, l'objet de la conception est défini comme un besoin, une idée. Le besoin peut être ensuite interprété sous forme de cahier des charges fonctionnel. Cette référence permettra aux différents acteurs du projet de valider la cohérence de leurs choix. Au cours du processus, le cahier des charges fonctionnel pourra être révisé et affiné. Le point de départ de toute conception est la formalisation explicite du besoin au travers de l'analyse fonctionnelle.

A l'étape de conception préliminaire, on est amené à évaluer un principe ou concept de solution. On a vu que cette évaluation requiert la connaissance du ou des matériaux constitutifs ainsi que du mode de mise en œuvre : c'est l'étape dite de sélection des matériaux et des procédés. Dans ce chapitre, on a exposé certaines de ces méthodes.

On retient de cette étude que pour effectuer des choix, l'ingénieur doit réunir des données fiables sur les caractéristiques des matériaux et sur les procédés de mise en œuvre. La formation et l'expérience permettent en théorie de construire cette connaissance. Mais, pour garantir l'objectivité des choix, les méthodes de sélection utilisent des bases de connaissance. Ces bases sont plus ou moins spécialisées selon le contexte et l'étape de conception. Notre travail s'inscrivant dans une démarche de conception innovante, nous avons choisi de développer une méthode basée sur une stratégie à requêtes ouvertes. Pour appliquer cette stratégie, nous envisageons de construire la démarche autour d'une base de données hiérarchisée contenant les attributs caractéristiques des différentes classes de matériaux à sélectionner.

Lorsqu'une conception monolithique n'est pas acceptable, on peut être amené à envisager des solutions multimatériaux. Après avoir introduit la notion de multimatériaux, on aborde les travaux dédiés à la proposition d'outil et à la mise au point de techniques favorisant le travail du concepteur. Au travers de ces exemples, nous avons pu mesurer les difficultés d'élaboration de ce type de démarche. En particulier, il n'est pas envisageable de proposer une méthode de

conception généralisée, adaptée à tous types de multimatériau.

Compte tenu de la relative jeunesse de ce thème de recherche et de l'étendue des choix à réaliser pour définir un multimatériau, les travaux à venir ne peuvent se soustraire aux études de cas. Ainsi, le prochain chapitre sera consacré à la présentation du cadre méthodologique et à la proposition d'une méthode applicable dans le cadre d'un problème industriel.

3 APPROCHES METHODOLOGIQUES DE LA CONCEPTION DE MULTIMATERIAUX

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but de présenter une démarche de conception de multimatériau et de montrer comment elle peut être mise en œuvre. Il convient de bien distinguer la démarche de conception en tant que telle et les outils ou techniques de résolution utilisés pour appliquer la démarche. Nous présenterons dans le chapitre suivant une application pratique de la démarche sur un exemple de conception industriel.

La première partie de ce chapitre consiste à proposer une démarche de conception de multimatériau. Tout d'abord nous revenons sur une méthode de sélection de matériau monolithique développée par Ashby. Ce rappel est nécessaire car la recherche de solutions monolithiques est une étape préliminaire qui, en cas d'échec, justifie d'envisager une recherche de solutions multimatériaux. A ce titre, nous introduirons un certain nombre de notions et définirons le vocabulaire que nous serons amenés à utiliser par la suite. Ensuite, nous fixerons les contours de la démarche de conception (Sur quel objet porte-t-elle ? Quand doit-t-elle être mise en œuvre ?). Le cadre ayant été dressé, nous aurons rassemblé suffisamment d'éléments pour détailler les étapes de la démarche telle que nous la concevons.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous décrirons les difficultés de mise en œuvre de la démarche de conception ce qui nous amènera à proposer et tester des outils sur un cas d'école.

3.2 PROPOSITION D'UNE DEMARCHE DE CONCEPTION DE MULTIMATERIAUX

3.2.1 Rappels sur la conception monolithique

Ce paragraphe est destiné à rappeler la terminologie de la méthode d'Ashby, méthode de sélection de matériau choisie comme point de départ de notre étude. Précédemment, nous avons montré que les méthodes de conception de produits pouvaient suivre différentes stratégies et nous avons conclu que, pour résoudre le problème de conception de conduite offshore, il était préférable de s'orienter vers une stratégie à requêtes ouvertes (paragraphe 2.2.1). La méthode proposée par Ashby [ASH01], dont les grandes étapes sont décrites au chapitre précédent, est un exemple concret appliquant cette stratégie. Elle permet de poser le problème de conception et propose des outils pour réaliser la sélection des matériaux dans le cadre d'une conception de

produit monolithique.

Données du problème

En premier lieu, cette méthode préconise qu'une attention particulière soit portée sur la clarification du besoin. Il convient d'utiliser des outils issus de l'analyse fonctionnelle qui mènera à l'établissement du cahier des charges fonctionnel. Ensuite, le concepteur choisit un principe de solution pour son application. Le principe de solution fixé implique alors un choix de forme pour la pièce à concevoir comme par exemple une poutre de section carrée ou rectangulaire, une plaque, un cylindre… Les données indispensables à la mise en application de la procédure de sélection des matériaux, forme de la pièce et fonctions à remplir, sont maintenant disponibles. Ces données sont traduites suivant une terminologie spécifique à la méthode d'Ashby qui introduit les notions d'astreinte, d'objectif et de variable libre.

Une **astreinte** (ou contrainte) de conception est une grandeur physique, géométrique, technique ou économique qui établit la limite d'acceptabilité d'un matériau ou plus généralement d'une solution. Une astreinte de conception est donc la traduction du besoin minimum. Autrement dit, toute conception est acceptable à partir du moment où l'ensemble des astreintes de conception est respecté. Les exemples d'astreintes de conception sont très variables. La raideur d'une poutre, la conductivité électrique, la transparence, la résistance à la température sont des exemples d'astreintes liées à un phénomène physique. Une astreinte peut porter sur la géométrie de la pièce qui fixe ou limite certaines dimensions. Les astreintes de conception peuvent également imposer des limites de coût de fabrication ou d'exploitation. Enfin, un cahier des charges peut imposer une limite sur l'utilisation d'une technique de fabrication ou plus directement sur le choix d'une classe de matériau.

La notion d'**objectif** de conception est plus difficile à mettre en évidence en contexte de conception préliminaire. De façon stricte, Ashby définit un objectif de conception comme une grandeur devant être optimisée. La conception à coût minimum, la conception à masse minimale ou la conception à raideur maximale sont des exemples d'objectifs de conception. Nous retiendrons à notre niveau qu'un objectif de conception est une grandeur permettant de comparer les matériaux ou les solutions acceptables vis-à-vis des astreintes de conception.

Certaines dimensions ne sont pas connues au départ de la procédure de sélection. Ces dimensions sont appelées les **variables libres** du problème. La phase de dimensionnement va permettre de préciser ces données géométriques.

En suivant ce formalisme, le problème de conception est mis en équation en suivant le schéma suivant :

1- Exprimer l'astreinte (A) en fonction de la variable libre (L), de la géométrie (G) et

des propriétés matériaux (M),

2- En déduire quand cela est possible l'expression de la variable libre (L) en fonction de l'astreinte (A), de la géométrie (G) et des propriétés matériaux (M),

3- Exprimer l'objectif de performance (O) en fonction de la variable libre (L), de la géométrie (G) et des propriétés matériaux (M),

4- En déduire avec 2, l'expression de l'objectif (O) en fonction de (A), (G) et (M).

Sélection en trois étapes

Le problème de conception étant maintenant correctement structuré (astreintes, objectifs et variables libres sont définis), le concepteur va pouvoir sélectionner les matériaux de la base de données qui correspondent au mieux à l'application visée. La méthode propose de suivre trois étapes : le filtrage, la classification et la documentation.

Au cours du **filtrage**, les matériaux de la base de données qui ne respectent pas les astreintes de conception sont éliminés. Les matériaux qui passent ce filtre sont considérés comme acceptables vis-à-vis du besoin.

L'étape de **classification** permet de comparer la performance des matériaux restants. On utilise l'objectif de conception comme métrique de comparaison.

La dernière étape est la **documentation**. Le concepteur retient les meilleures solutions en tenant compte des informations dites locales. Ces informations peuvent dépendre du contexte dans lequel évolue l'entreprise et sont parfois difficiles à intégrer dans une base de données de matériaux. Elles permettent de finaliser la procédure en départageant par exemple des solutions apparemment voisines.

Ce rappel de la méthode de sélection des matériaux permet d'une part de souligner l'importance de la phase de filtrage dans une procédure plus générale de conception et d'autre part, elle nous montre la frontière entre la conception d'un produit monolithique et la conception d'un multimatériau. Le passage à la conception multimatériau se justifie entre autre si on ne trouve aucun matériau qui satisfait l'ensemble des astreintes de conception.

Ces rappels sont nécessaires car les méthodes de conception de multimatériaux ne peuvent pas être entièrement découplées des méthodes de conception de produit monolithique. Un intérêt de s'appuyer sur une méthode connue est que notre méthode pourra s'intégrer dans une procédure de conception plus globale.

3.2.2 Composantes du problème de conception

La démarche de conception du multimatériau intervient après qu'une recherche de solution monolithique ait été réalisée. Dés lors, on supposera que tous les éléments de conception nécessaires à cette phase sont disponibles et restent inchangés pour la recherche des solutions multimatériaux. Ces éléments fixés comprennent (i) l'identification du besoin et sa formalisation dans le cahier des charges, (ii) le choix d'un principe de solution. Par ailleurs de nouveaux éléments doivent être déterminés au cours du processus de conception de multimatériau, ces éléments sont (iii) les paramètres d'identification du multimatériau.

Identification du besoin et cahier des charges fonctionnel

Ces notions ont été introduites au cours de l'étude bibliographie. On retient que c'est une étape fondamentale de l'activité de conception au cours de laquelle le concepteur peut saisir de façon objective l'ensemble des attendus du client et que son travail peut être supporté par des outils comme le cahier des charges fonctionnel.

Principe de solution

Pour illustrer ce concept, nous nous reposons sur l'exemple de conduites d'hydrocarbures. D'un point de vue très général, le problème posé par l'industriel consiste à trouver des solutions pour transporter des effluents dans un environnement marin. En observant les techniques industrielles pour le transport de produits, on constate que deux principes sont généralement proposés : le transport modulaire ou le transport en continu. Le choix de l'un ou l'autre de ces principes doit prendre en compte des données comme le coût énergétique du transport, la maintenance, la flexibilité du système, la disponibilité, le type de produit à transporter … Il existe une série de contraintes et pour l'application visée, notre choix se tourne vers le principe de transport en continu car les produits à transporter sont des fluides, les distances sont parfois longues et les canalisations sont omniprésentes dans le domaine industriel concerné. Ce choix de principe de solution induit le choix de la forme cylindrique comme géométrie d'ensemble de la solution.

Paramètres d'identification du multimatériau

Nous revenons sur une définition des multimatériaux pour introduire les paramètres d'identification qui les caractérisent. La bibliographie montre qu'une structure multimatériau est correctement définie si l'on connaît le mode de mise en œuvre, les constituants et la nature de la combinaison. La nature de la combinaison se décline ensuite suivant quatre paramètres : l'échelle de combinaison, la nature de la liaison, la quantité relative de chaque constituant et l'architecture

de la combinaison. Enfin, pour décrire complètement la solution au problème de conception utilisant un multimatériau il faut, en plus des paramètres précédents, connaître la géométrie c'est-à-dire la forme du produit et les épaisseurs. Le processus de conception doit permettre de préciser l'ensemble de ces informations. Pour y parvenir, il faut qu'au cours du processus de conception, on puisse évaluer le comportement d'une solution vis-à-vis des actions spécifiées dans le cahier des charges fonctionnel. D'une part, nous avons les paramètres fonctionnels (les actions) et de l'autre, les paramètres géométriques et les propriétés matériaux qui caractérisent la solution. Les informations sur les matériaux sont supposées connues ; elles sont regroupées dans une base de données qui contient les différentes classes de matériaux. Nous reviendrons sur ce point plus tard dans ce document.

La question est maintenant de préciser sur quel type de multimatériau va porter la conception. En effet, il semble peu probable, au vu de la diversité des multimatériaux envisageables et des contextes, d'imaginer que l'on puisse proposer une seule et unique méthode de conception. La démarche de conception de multimatériau doit donc se spécialiser. Le paragraphe suivant tente de fixer un cadre dans lequel s'inscrit la démarche de conception de multimatériaux que nous proposons.

3.2.3 Cadre méthodologique

La bibliographie réalisée montre que l'activité de conception porte sur un système qui est par nature incomplètement défini. Les objets intermédiaires de la conception évoluent donc à mesure que l'on avance dans le processus. Notre étude porte sur la première phase de la conception, dite phase de conception préliminaire, au cours de laquelle le concepteur possède une idée assez peu précise du besoin. Cette phase doit permettre d'évaluer et de comparer un ou plusieurs principes de solutions. A l'issue de cette phase, on s'attend alors à avoir une idée un peu plus précise du système sur lequel va porter la phase de conception détaillée. Dans le cadre de cette étude (conception de canalisation pour le transport d'hydrocarbures), on a vu qu'un principe de solution peut être identifié et par la suite, nous considèrerons cet élément de conception comme acquis.

Selon les principes de l'ingénierie simultanée, le choix préliminaire de la méthode de fabrication devrait être intégré dans le processus de conception. Toutefois, dans l'état actuel de nos connaissances et dans un souci de clarté et de découplage des problèmes, nous choisissons de ne pas aborder cette phase du cycle de vie du produit. Il semble en effet que ce soit un sujet de réflexion à part entière et qui doit donc être écarté dans le cadre de cette étude.

La diversité et le nombre de paramètres d'identification des multimatériaux montre qu'il

est difficile de proposer à court terme une démarche de conception généralisée. Il est donc raisonnable de réduire le nombre de paramètres d'identification à déterminer afin de concentrer l'étude sur la conception de familles de multimatériaux pour lesquelles on peut apporter une réponse en termes de méthode et qui soit également applicable au cas de conception concret posé par l'industrie pétrolière. Dans le cadre de cette étude, on propose de fixer (i) l'architecture du multimatériau, (ii) le type de liaison et (iii) l'échelle de la combinaison.

(i) L'architecture : Si on part du problème de conception de conduite sous-marine, abordé en détail au chapitre 4, on montre que la conception s'oriente naturellement vers la recherche d'un multimatériau possédant une architecture spécifique. De façon générale elle peut être aléatoire ou ordonnée mais pour l'application visée, les multimatériaux à architecture ordonnée de type série/parallèle semblent les plus probables. Appliquée à la conception de conduite, l'architecture sera donc un multicouche axisymétrique.

(ii) Le type de liaison : La démarche de conception de multimatériau devra être appliquée à une étape préliminaire de la conception. Cette étape de la conception ne requiert pas une précision importante lors de l'évaluation du produit. Ainsi, les modèles de comportement seront relativement simples et pour limiter les difficultés de modélisation, on supposera que les constituants sont parfaitement liés.

(iiii) Echelle de combinaison : L'échelle de combinaison peut être micro, méso ou macroscopique. Dans cette étude, on supposera une échelle de combinaison macroscopique. Cette hypothèse pourra être remise en question si par exemple les solutions retenues tendent vers des multimatériaux dont les constituants possèdent des couches d'épaisseur extrêmement faible.

Au cours de la procédure de conception, on sera amené à déterminer le comportement du multimatériau afin de vérifier l'adéquation qui existe entre le besoin et le produit. Cette analyse nécessitera donc l'utilisation de modèles de comportement. Au stade de la proposition de modèle on retiendra que certaines informations liées au multimatériau sont d'ores et déjà connues. Il s'agit de

- la forme du produit,
- le type de liaison,
- l'échelle de combinaison,
- l'architecture de la combinaison.

Les inconnues du problème de conception sont :

- les constituants,
- la proportion de chaque constituant et l'épaisseur de paroi.

En résumé, connaissant la forme de la solution recherchée, l'architecture du multimatériau, l'échelle de combinaison et la nature des liaisons entre les constituants, la méthode de conception devient alors une méthode de sélection des constituants du multimatériau et de dimensionnement.

Remarque: Dans cette étude, nous imposons une hypothèse forte en choisissant de fixer l'architecture du multimatériau. On peut souligner à ce niveau des différences notables entre les démarches de conception de multimatériau.

- *Un premier type de démarche consiste à choisir a priori l'architecture du multimatériau et à chercher ensuite les constituants qui sont acceptables vis-à-vis du cahier des charges fonctionnel : c'est ce type de démarche que nous appliquerons.*
- *Un second type de démarche aurait pour objectif d'effectuer un choix d'architecture, connaissant les constituants. Ce type de démarche nécessiterait notamment de disposer d'un catalogue d'architecture et des modèles de comportement correspondants.*
- *Un troisième type de démarche consisterait à choisir simultanément l'architecture du multimatériau et les constituants.*

La démarche de conception doit alors être adaptée au problème rencontré par les concepteurs de conduites sous-marines pour l'offshore. Néanmoins, nous insistons sur le fait que cette démarche est proposée afin d'avoir une portée plus large que la stricte résolution du problème industriel. Elle doit pouvoir être généralisée pour d'autres types d'architectures.

3.2.4 Proposition d'une démarche

La démarche de conception d'un multimatériau débute, comme pour tout produit, par l'analyse du ou des besoins du client. C'est la base du projet et il y sera fait régulièrement référence. Cette analyse détaillée permet de collecter l'ensemble des informations relatives aux différentes situations de vie du produit. Cette étape s'achève lorsque l'équipe de conception possède suffisamment de données pour débuter la recherche de concepts ou de solutions de principe.

La recherche de concept s'effectue à l'aide de techniques qui font appel au raisonnement, à l'expérience ou à l'imagination de l'ingénieur. Il procède à la classification des idées et retient celles qui lui paraissent viables, en concordance avec le cahier des charges fonctionnel.

La suite est l'étude de faisabilité : elle a pour but d'étudier qualitativement les différents aspects des concepts : mise en œuvre, disponibilité, risques, coûts, opérabilité. Cette étude peut être synthétisée dans un seul tableau permettant de comparer rapidement les différentes propositions. Il faut pouvoir se prononcer sur les chances de réussites du projet à l'issue de cette phase. Les solutions pressenties sont alors sélectionnées. On en conserve en général un nombre réduit de façon à ne pas multiplier les études en aval.

A l'étape suivante, les ingénieurs vont mener des études afin d'évaluer plus précisément les deux ou trois concepts retenus précédemment. Ces études préliminaires demandent une description générale des concepts, toutefois il est nécessaire d'aboutir à un niveau de détail suffisant qui permette de vérifier l'adéquation entre le produit et les fonctions exigées dans le cahier des charges. Il s'agira en particulier de déterminer si le concept respecte les restrictions minimales imposées et de mesurer et comparer les performances.

Pour parvenir à une description de la pièce, l'ingénieur doit réunir plusieurs informations : la forme, le ou les matériaux constitutifs ainsi qu'un dimensionnement préliminaire. Partant du principe que l'ingénieur connaît la forme de la pièce, il doit être en mesure, au moyen de modèles de comportement simples, de dégager un cahier des charges matériau. Il rentre alors dans la phase de sélection des matériaux. Celle-ci peut être réalisée en utilisant les outils de la méthode présentée au paragraphe 3.2.1. Cette méthode s'articule autour de trois phases qui sont, pour rappel, le filtrage, la classification et la documentation. Si au cours du filtrage, tous les matériaux de la base de données n'ont pas été éliminés alors la méthode de sélection permet de choisir le matériau le plus performant pour la réalisation. En parallèle, il sera nécessaire de mener une étude sur le procédé de mise en œuvre. Là encore, il existe des méthodes adéquates exploitant des bases de connaissances comme c'est le cas pour la sélection des matériaux.

Si après le filtrage, on constate qu'il n'y a pas de solution matériau au problème, on peut envisager de procéder à la conception d'un multimatériau. Et si on connaît l'architecture de ce multimatériau, la méthode de conception du multimatériau devient une méthode de sélection des constituants du multimatériau et de dimensionnement (Cf. paragraphe 3.2.3). L'étude préliminaire se termine lorsque plusieurs solutions multimatériaux ont pu être dégagées. Connaissant les solutions multimatériaux et leurs dimensionnements, l'ingénieur est en mesure de mener une étude comparative. De là, il possède tous les éléments pour prendre une décision objective.

> *Remarque : Il est important de rappeler le caractère itératif du processus de conception. L'ingénieur propose une description de la solution en spécifiant la géométrie et les matériaux utilisés mais il doit également veiller à ce que les solutions proposées soient réalisables. Ainsi, la méthode de conception doit intégrer une phase de choix de procédé de mise en œuvre. Nous prenons ici le parti de ne pas en faire mention et supposerons que la recherche des modes de mise en œuvre sera réalisée après avoir complètement défini les solutions multimatériaux. Il est bien sur toujours possible d'intégrer des critères de fabrication lors du choix de matériau. On pense en particulier qu'une matrice de compatibilité entre les matériaux pourrait être très utile. Toutefois, considérant qu'a priori la recherche de procédés de fabrication va augmenter les contraintes sur les solutions proposées, il conviendra de ne pas se limiter aux premières solutions multimatériaux mises en évidence, mais on choisira de conserver un nombre suffisant de solutions préliminaires afin de faire aboutir convenablement le processus de conception.*

A présent, ce paragraphe traite spécifiquement de la procédure pour le choix des constituants du multimatériau et pour le dimensionnement (voir Figure 3-1).

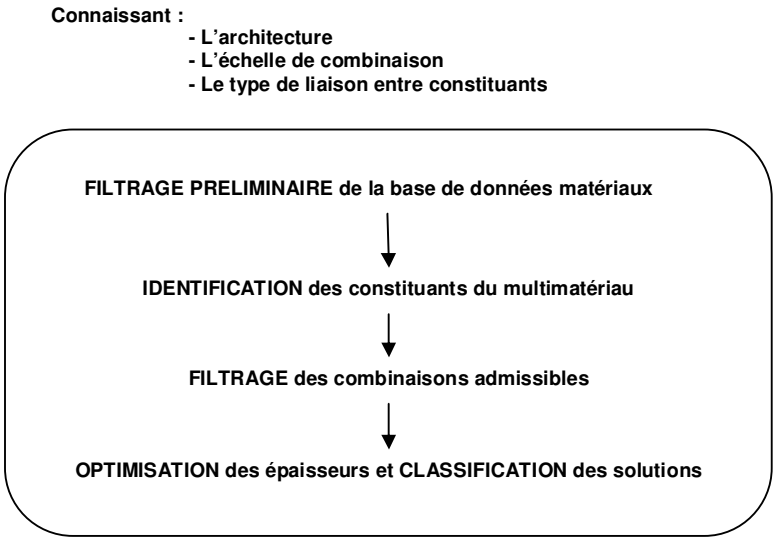


Figure 3-1 : Diagramme des opérations successives pour la conception de structure multimatériau à architecture donnée

Les différentes étapes de la procédure schématisée sur cette figure sont développées ci-après.

Filtrage préliminaire de la base de données matériaux

On suppose que l'on dispose d'une base de données de matériaux monolithiques similaire à celle présente dans le logiciel de CES, utilisée pour la recherche de solutions monolithiques. Durant cette phase, les critères d'élimination des matériaux résultaient de l'analyse des astreintes de conception. Et si, pour un matériau donné, toutes les astreintes ne pouvaient pas être satisfaites, alors ce matériau était rejeté. Pour la conception d'un multimatériau, le filtrage s'opère différemment car on va conserver tous les matériaux qui possèdent au moins une astreinte de conception satisfaite. Partant du principe que si un matériau satisfait une partie du cahier des charges fonctionnel et qu'un autre matériau permet de satisfaire l'autre partie, alors il est possible, en combinant ces deux matériaux de trouver une solution satisfaisant simultanément l'ensemble des requêtes du cahier des charges fonctionnel. Les matériaux éliminés seront ceux qui ne satisfont aucune astreinte de conception. A l'issue de cette phase, il reste dans la base de données uniquement des matériaux qui sont potentiellement capables de rentrer dans la constitution d'un multimatériau : par la suite, on les appellera « constituants du multimatériau » ou plus simplement « constituants ».

Identification des constituants

Nous considérons tout d'abord un problème à deux couches (donc deux constituants). Pour affecter un constituant à chacune des couches, on va chercher les matériaux complémentaires en suivant le principe énoncé précédemment, c'est-à-dire que deux matériaux sont dits complémentaires si leur réunion permet de satisfaire l'ensemble des astreintes du cahier des charges fonctionnel. A l'issue de cette phase, on doit être en mesure d'établir une liste de couple de constituants. Chaque couple est un embryon de solution multimatériau. Il faut encore valider le comportement du multicouche et évaluer si ce couple permet effectivement de satisfaire l'ensemble des astreintes de conception.

La démarche a été décrite pour un bicouche, mais plus généralement, pour un nombre de couches donné, si aucune solution multimatériau ne convient, on pourra chercher à passer à un nombre de couches supérieur, et la démarche est similaire.

Filtrage combinaisons de constituants admissibles

On cherche dans cette étape à limiter l'étendue du domaine de solutions à explorer. Pour cela, on réalise une restriction du domaine en excluant, pour la suite de la procédure, toutes les solutions qui ne sont pas acceptables vis-à-vis des astreintes du cahier des charges fonctionnel.

En effet, la combinaison de plusieurs matériaux au sein d'un multicouche donne naissance à un nouveau matériau qui bénéficie d'une partie des propriétés de chacun de ses constituants. Ce principe de combinaison a déjà été introduit par Ashby et Bréchet [ASH03] et est illustrée sur la Figure 3-2.

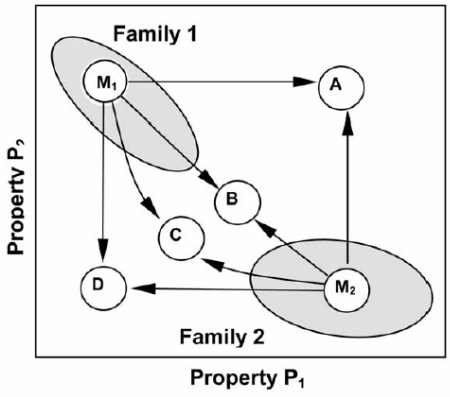


Figure 3-2 : Possibilité de combinaison de deux matériaux M_1 et M_2 [ASH03]

En fonction de la nature de la combinaison et de la proportion de chaque constituant, ici M_1 et M_2, le multimatériau résultant possède des propriétés qui pourraient satisfaire les critères établis dans le cahier des charges fonctionnel et qui peuvent être représentés sur un graphe de

propriétés par des courbes de type A, B, C ou D (Figure 3-2). La manière la plus simple d'évaluer les propriétés d'un multicouche est l'utilisation d'une loi des mélanges et de déterminer des propriétés équivalentes par l'intermédiaire des propriétés matériaux, de leur agencement et de leurs proportions. Ce type de loi est applicable à des propriétés comme la rigidité dans certaines conditions ou la masse volumique. Pour d'autres propriétés, il sera plus difficile d'utiliser des lois aussi simples mais on pourra avoir recours à des modèles de comportement faisant intervenir directement l'épaisseur de chaque constituant.

En définitive, le filtrage des combinaisons de constituants admissibles repose sur le principe de filtrage tel qu'on le concevait pour les matériaux monolithiques. On cherche à valider si un matériau multicouche caractérisé par l'association de plusieurs constituants et de leurs proportions respectives satisfait les critères du cahier des charges. Le résultat de cette étape conduit à construire un ensemble de solutions au problème de conception.

Optimisation des épaisseurs et classification des solutions

Cette ultime étape de la procédure de conception consiste à retenir les meilleures solutions du problème de conception. Pour chaque combinaison de constituants, on possède un ensemble de solutions acceptables vis-à-vis des astreintes de conception. L'optimisation des épaisseurs consiste à garder les solutions optimisant la performance visée. On réalise cette optimisation sur toutes les combinaisons admissibles et on procède au classement suivant l'objectif de performance. Si le problème possède plusieurs objectifs de conception, la méthode devient moins objective car, comme c'est le cas pour la sélection des matériaux monolithiques, il faudra être en mesure d'estimer des valeurs d'échange entre les objectifs de performance.

3.3 MISE EN ŒUVRE DE LA DEMARCHE DE CONCEPTION

Dans le paragraphe précédent, nous avons proposé une démarche de conception de multimatériau. Cette démarche s'appuie sur la connaissance préalable de l'architecture du multimatériau et doit permettre de choisir les constituants du multimatériau en fonction des spécifications techniques énoncées dans le cahier des charges fonctionnel. Pour sélectionner les constituants, il est nécessaire de disposer d'une base de données de matériaux, complète et correctement organisée.

Ce paragraphe est consacré à la présentation d'une technique de mise en œuvre de la démarche de conception adaptée au problème industriel. Nous appliquons d'abord la démarche sur un cas élémentaire, suffisamment simple pour pouvoir être traitée avec des outils simples et intuitifs. Nous reviendrons ensuite sur les spécificités du problème industriel pour proposer un outil de résolution applicable dans le cadre d'une conception préliminaire.

Les résultats attendus sont la mise à disposition d'un outil capable de gérer notamment le grand nombre de solutions envisageables.

3.3.1 Résolution d'un problème élémentaire de conception

Nous pouvons observer qu'une grande majorité de problèmes industriels peut être qualifiée de problèmes multicritères. Ces problèmes possèdent plusieurs astreintes de conception ou plusieurs objectifs de conception ou encore les deux à la fois. Si la forme de la pièce est connue, il est possible d'appliquer des méthodes de sélection de matériaux pour résoudre ce type de problème. Afin d'illustrer la démarche de conception de multimatériau proposée au paragraphe précédent, nous posons un problème élémentaire de sélection multicritère pour la conception d'une pièce dont la forme est connue.

Ce problème est mono-objectif et il possède trois astreintes de conception : une astreinte portant sur la géométrie et deux astreintes physiques. Enfin, le problème possède une inconnue géométrique, dite variable libre du problème. Il s'agit de trouver quels sont les matériaux, s'ils existent, qui permettent d'optimiser l'objectif de performance.

En cherchant tout d'abord les solutions monolithiques, on peut résoudre le problème en appliquant la méthode dite des équations couplées et des indices de performance équivalents [ASH01].

L'application de cette démarche conduit, pour chaque astreinte physique de conception, à une expression de la variable libre, qui peut être une fonction des paramètres géométriques fixés,

des propriétés matériaux et des requêtes fonctionnelles. Pour chaque matériau de la base de données, on peut calculer la valeur de la variable libre optimale qui satisfait l'astreinte considérée ; dans notre cas, étant donné que l'on a deux astreintes physiques, cette évaluation numérique conduit à deux valeurs V1 et V2 pour chaque matériau de la base de données.

En supposant que l'astreinte portant sur la géométrie, notée Vg, par exemple une grandeur maximale d'encombrement, est directement reliée à la variable libre de conception, il est possible de comparer les astreintes physiques et l'astreinte géométrique pour déterminer si un matériau donné respecte les astreintes. Cette recherche de solutions monolithiques est appelée étape de filtrage.

L'étape de filtrage est illustrée sur la Figure 3-3 pour deux problèmes a) et b) distincts mais possédant des caractéristiques identiques à celles énoncées plus haut : deux astreintes de conceptions (1) et (2) imposant une valeur minimale à la variable libre, respectivement V1min et V2min, et une astreinte géométrique imposant une valeur maximale à la variable libre, soit Vgmax et repérée par des lignes en pointillés. Chaque axe de la Figure 3-3 correspond à une astreinte physique de conception. Chaque astreinte donnant une valeur à la variable libre, il y a pour un matériau donné, deux dimensionnements possibles. Les nuages de points représentent les matériaux de la base de données.

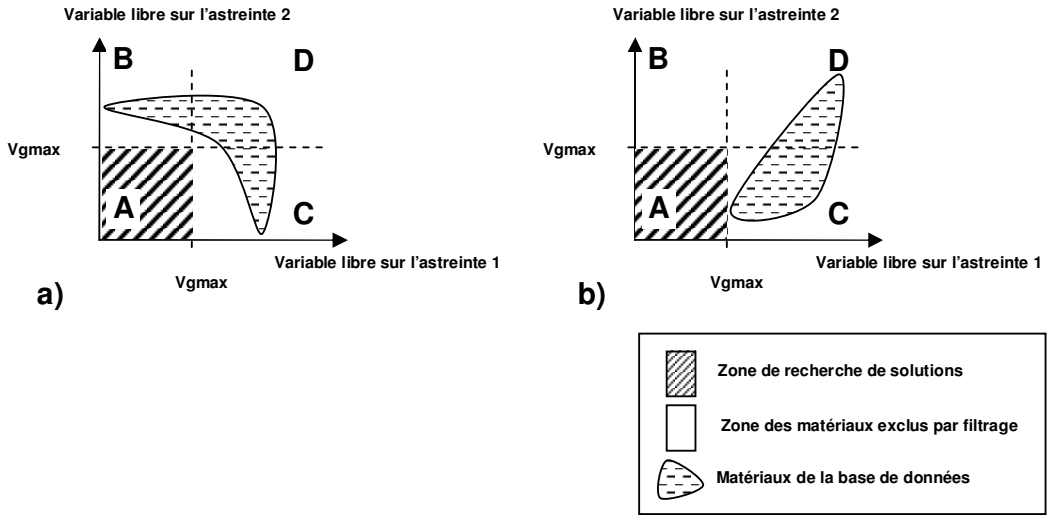


Figure 3-3 : Différentes positions du nuage de points

Par conséquent, pour ces deux problèmes, un matériau est acceptable si les conditions suivantes sont vérifiées simultanément :

$$V1min<Vgmax$$

$$V2min<Vgmax$$

L'astreinte de conception géométrique imposant une borne supérieure sur la valeur de la variable libre, les graphiques de la Figure 3-3 sont partagés en quatre zones :

- La zone A qui contient les matériaux pour lesquels les trois astreintes sont compatibles (V1min<Vgmax et V2min<Vgmax) ;
- Les zones B et C qui contiennent les matériaux pour lesquels une seule astreinte physique est compatible avec l'astreinte géométrique (V1min<Vgmax ou V2min<Vgmax) ;
- La zone D qui contient les matériaux pour lesquels aucune astreinte physique n'est compatible avec l'astreinte géométrique (V1min>Vgmax et V2min>Vgmax).

Les nuages de points, représentant les matériaux de la base de données indiquent par leurs positions s'il existe des solutions monolithiques au problème de conception. Dans les deux cas, a) et b) de la Figure 3-3, il n'y a pas de matériau dans la zone A, ce qui signifie qu'il n'existe pas de solution monolithique et qu'on peut donc envisager une solution multimatériau.

Par application de la méthode proposée au paragraphe précédent, il convient tout d'abord de filtrer les matériaux qui sont probablement inacceptables. Cette étape est illustrée sur les exemples de la Figure 3-3. Tous les matériaux présents dans la zone D sont éliminés puisque aucune astreinte n'est compatible avec l'astreinte géométrique.

On cherche ensuite à identifier les couples de matériaux susceptibles de respecter l'ensemble du cahier des charges fonctionnel. Sur l'exemple de la Figure 3-3 a), certains matériaux appartiennent au quadrant B et d'autres sont présents dans le quadrant C. En associant des matériaux de ces deux zones, il est possible que l'ensemble des astreintes du cahier de charges soit satisfait. Par contre, sur l'exemple du graphique b), il n'y a aucun matériau dans la zone B pour « compléter » les matériaux présents dans la zone C. On peut alors penser que la méthode de conception ne peut pas apporter de solution multimatériau à ce problème.

La méthode se poursuit sur le problème de la Figure 3-3 a) pour lequel on doit identifier les couples de matériaux potentiels. Une recherche de modèle sera nécessaire afin d'estimer les propriétés de la combinaison de deux matériaux. Ces modèles feront intervenir des paramètres géométriques, fonctionnels et matériaux (propriétés et proportions). Pour un couple de matériaux, on peut représenter l'ensemble des multimatériaux issus de ce couple par une courbe en faisant varier la proportion de chaque constituant et en vérifiant s'ils sont acceptables (cf. Figure 3-4). Sur cette figure on présente deux courbes reliant deux matériaux présents dans les quadrants B et C. Pour la courbe 1, on obtient un ensemble de multimatériaux qui satisfont les critères fonctionnels. En effet, la courbe 1 traverse la zone A. On peut ainsi identifier les points m_1 et m_2 d'« entrée » et de « sortie » de la zone intéressante. Pour chacun de ces points, on

connaît la proportion de chaque constituant M_1 et M_2. Ainsi, pour un multimatériau acceptable donné, on rassemble plusieurs informations : les deux constituants, un intervalle de proportion des constituants et les épaisseurs correspondantes.

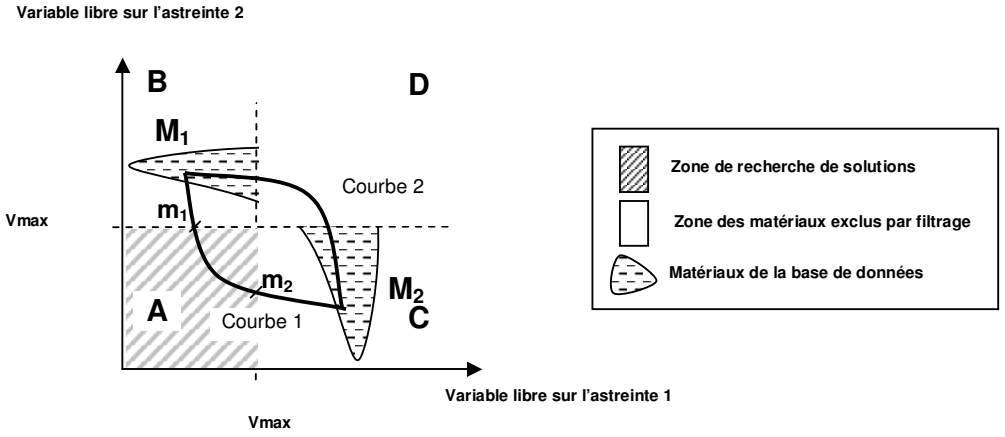


Figure 3-4 : Exemples de couplage

Cette étape de filtrage se conclut lorsque pour l'ensemble des couples de matériaux admissibles, on a pu calculer l'intervalle de proportion qui permet de satisfaire les astreintes de conception. Toutefois, il n'est pas toujours possible de trouver des solutions admissibles. En effet, si le couplage 1 de la Figure 3-4 permet de trouver des solutions multimatériaux dans la zone « intéressante », le couplage 2 n'aboutit à aucune solution. La différence entre les courbes 1 et 2 découle des lois d'association des propriétés des constituants M_1 et M_2.

La dernière étape de la démarche consiste à chercher l'optimum de conception pour chaque couple de constituant. On se place dans le plan de l'objectif de performance dans lequel on reporte les courbes d'association exprimées en termes d'objectif de conception (Figure 3-5).

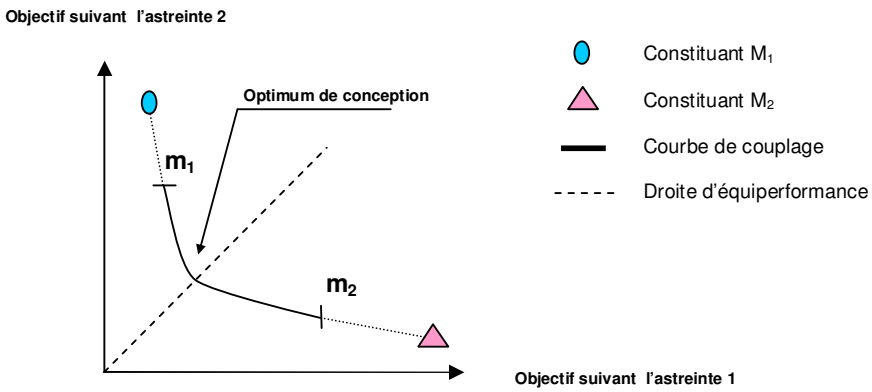


Figure 3-5 : Recherche de l'optimum de conception pour un couple de constituants donné.

La courbe de couplage est tronquée puisque le couple de constituants M_1 et M_2 n'est pas valable sur tout l'intervalle de proportion comme cela a été montré à l'étape précédente. On définit qu'une solution est optimale lorsqu'elle est non dominée, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de surdimensionnement pour l'une ou l'autre des astreintes physiques de conception. L'optimum de conception est alors déterminé pour une certaine proportion de constituants. Cet optimum est à l'intersection entre la courbe de couplage et la droite d'équiperformance. Ainsi, pour un couple de matériau donné, on connaît la fraction de constituant qui conduit à un optimum de conception.

Cette opération d'optimisation se répètera autant de fois que l'on a de couple de constituants. Lorsque chaque optimum sera connu, on pourra procéder au classement.

3.3.2 Application à un cas d'école

3.3.2.1 Présentation du cas d'école et traduction du problème

L'objet de la conception (Figure 3-6) est une poutre. Découlant de l'analogie avec une section de tube de faible épaisseur devant son diamètre, on impose deux astreintes physiques de conception : la raideur en traction Ko et la résistance thermique transverse Uo. La largeur bo et la longueur Lo sont données. Un encombrement maximum admissible sur l'épaisseur e_{adm} est imposé.

L'objectif de la conception consiste à choisir le matériau de la base de données qui minimise la masse de la poutre.

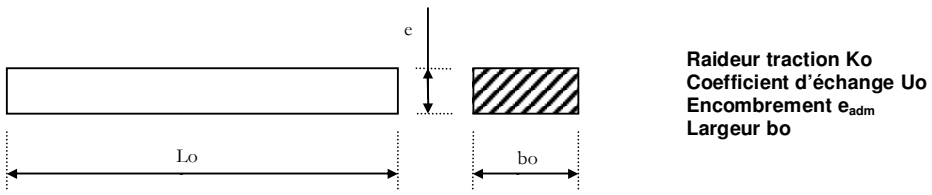


Figure 3-6 : Objet de la conception

L'astreinte mécanique implique que la raideur de la poutre en traction K soit supérieure à la limite exprimée dans le cahier des charges Ko. L'expression de la raideur pour un matériau quelconque est donnée par la relation K=E.e.bo/Lo où E est le module d'élasticité et e est l'épaisseur, variable libre du problème. L'astreinte de raideur est vérifiée pour K>Ko.

La deuxième astreinte de conception impose une isolation thermique de la poutre dans la direction transversale, c'est-à-dire dans le sens de l'épaisseur. On définit par U, le coefficient d'échange thermique global. Ce coefficient représente l'aptitude d'une paroi à s'opposer aux pertes thermiques en considérant des échanges par conduction en régime permanent. Plus sa

valeur est grande plus la paroi va dissiper d'énergie. Le cahier des charges impose une valeur maximale, Uo, à ne pas dépasser. Le coefficient U dépend de la conductivité thermique λ du matériau et de l'épaisseur de paroi soit : $U=\lambda/e$. Cette seconde astreinte est vérifiée pour $U<Uo$.

Pour l'application numérique, on prendra $Ko=10^7 N/m$, $Uo=3 W.m^{-2}.K^{-1}$, $e_{adm}=15$ mm, Lo=1 m, bo=10 cm.

Les expressions des astreintes de conception permettent de déduire deux équations donnant la variable libre et conduisent au système suivant :

$e_{mécanique} = (Ko.Lo)/(E.bo)$

$e_{thermique} = \lambda/Uo$ avec $e_{mécanique}$ et $e_{thermique}$ les épaisseurs obtenues respectivement à partir des astreintes mécanique et thermique.

L'objectif de conception est de trouver le matériau qui minimise la masse de la poutre tout en respectant les deux astreintes de conception et l'astreinte d'encombrement. La masse de la poutre est une fonction de la masse volumique ρ et des données géométriques. Elle est donnée par la relation, $m= \rho.Lo.bo.e$

3.3.2.2 Résolution du problème de conception

Existence de solutions monolithiques

Avant de procéder au classement des solutions, il faut éliminer les matériaux qui ne sont pas acceptables du point de vue de l'encombrement. Pour chaque matériau, on calcule l'épaisseur nécessaire pour satisfaire les astreintes de conception. Comme il y a deux astreintes physiques dans le problème de conception, il y aura pour chaque matériau un couple de valeurs correspondant à l'épaisseur nécessaire pour satisfaire chacune des astreintes qui sont appelées $e_{mécanique}$ et $e_{thermique}$. Ce couple est reporté en Figure 3-7 dont les axes portent la variable libre du problème selon chaque astreinte de conception.

Le cahier des charges fixe l'encombrement à 15 mm. Cela signifie que tous les matériaux qui donnent des valeurs d'épaisseur supérieures sont rejetés. Sur la Figure 3-7, on a reporté la limite d'encombrement. On retrouve les quatre zones A, B, C et D décrites dans le paragraphe précédent. Les résultats de cette analyse sont reportés dans le Tableau 3-1.

Le Tableau 3-1 donne le nombre de matériaux entrant dans les groupes A, B, C et D. Les matériaux de la base de données sont répartis suivant les classes de matériaux génériques.

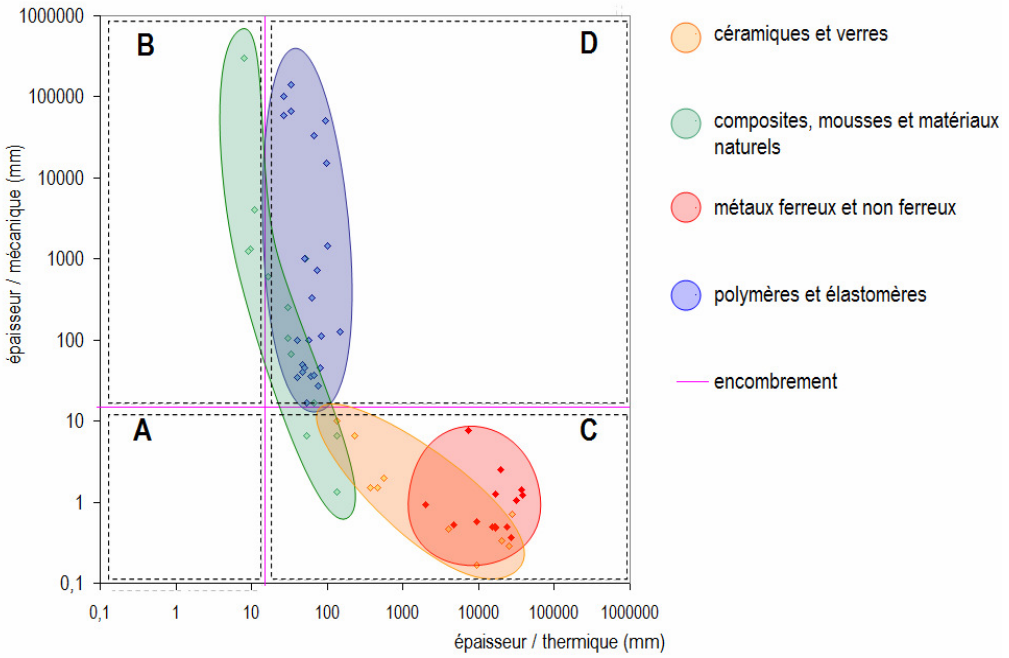


Figure 3-7 : Filtrage des matériaux de la base de données

Tableau 3-1 : Création des groupes de matériaux

	groupe A	groupe B	groupe C	groupe D
Céramiques et verres	0	0	10	0
Composites, mousses et matériaux naturels	0	5	4	4
Métaux ferreux et non ferreux	0	0	15	0
Élastomères et polymères	0	0	1	23
total	0	5	30	27

Dans notre cas, il n'y a aucun matériau dans la zone A. Il n'y a donc pas de solution monolithique au problème de conception. La recherche de solutions multimatériaux est justifiée.

Recherche de solutions multimatériaux

Avant de procéder à la conception du multimatériau, la démarche requiert qu'un choix d'architecture soit arrêté. Pour ce problème de conception, on propose une architecture à deux couches de telle sorte que les matériaux soient empilés dans le sens de l'épaisseur. Le problème possède alors deux variables libres, respectivement l'épaisseur de chaque constituant (Cf. Figure 3-8).

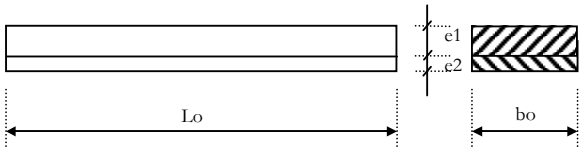


Figure 3-8 : Architecture multicouche de la poutre multimatériaux

A] Filtrage préliminaire des matériaux de la base de données

Le filtrage préliminaire de la base de données consiste à éliminer les matériaux qui ne satisfont aucune astreinte de conception. Dans notre cas, il s'agit des matériaux présents dans le quadrant D. Sur les 62 matériaux présents au départ dans la base de données, seuls 38 assurent au moins une astreinte de conception. On constate que 85% des matériaux éliminés font partie de la classe des élastomères et des polymères.

B] Identification des constituants du multimatériau

On cherche ensuite à associer des couples de constituants. Cette identification est illustrée graphiquement sur la Figure 3-7. Les matériaux du groupe C sont très performants suivant l'astreinte mécanique et correspondent en majorité aux métaux, puis aux verres et céramiques et enfin à quelques matériaux composites. Les matériaux du groupe B sont principalement des mousses polymères. Cette première analyse confirme l'intuition qui voulait que la solution multimatériau soit réalisée par la combinaison de matériaux connus pour leur forte rigidité tels que les métaux et de matériaux possédant de bonne propriété d'isolation thermique comme les mousses polymères. Il y a 150 (=30x5) combinaisons de constituants possibles. Il faut confirmer si ces combinaisons permettent de créer des multimatériaux acceptables c'est-à-dire si elles se trouvent dans la zone A.

C] Filtrage des combinaisons admissibles

Pour parvenir à filtrer les combinaisons admissibles, il faut établir les modèles de comportement de la combinaison.

Pour un empilement de couches parallèles à l'effort de traction et en supposant que la déformation est identique dans les deux couches, la rigidité axiale du bimatériau est une combinaison du module de chaque couche pondéré par la fraction volumique.

$E_{eq} = \sum_i E_i \cdot V_i$ où V_i est la fraction volumique et E_i est le module d'élasticité du matériau de la couche i.

La chaleur transmise par conduction en régime permanent et sans dissipation à travers un bimatériau d'épaisseur e est fonction de la résistance thermique de chaque couche. Le coefficient

d'échange U définit l'aptitude d'une paroi à s'opposer aux pertes par conduction.

$U = \left[e \cdot \sum_i V_i / \lambda_i \right]^{-1}$ où e est l'épaisseur totale de la poutre, V_i est la fraction volumique et λ_i est la conductivité thermique du matériau de la couche d'indice i.

Pour un couple de matériau donné, on trace sur la Figure 3-9 l'évolution des épaisseurs nécessaires pour satisfaire chaque astreinte de conception en fonction de la fraction volumique des constituants. Un multimatériau est acceptable s'il se trouve dans le quadrant inférieur gauche. Pour des raisons de clarté, on choisit de représenter uniquement deux combinaisons. La première combinaison associe une mousse polyuréthane et un acier au carbone, la seconde associe une mousse polystyrène et un composite carbone époxyde [0°, 90°].

Pour la première combinaison (mousse PU/acier), le pourcentage en volume de mousse donne des valeurs acceptables allant de 53% à 96%. En dehors de cet intervalle, le multimatériau ne respecte pas les astreintes de conception. Pour la seconde combinaison (mousse PS/composite), l'intervalle de proportion volumique de mousse acceptable est défini entre 31% et 95%.

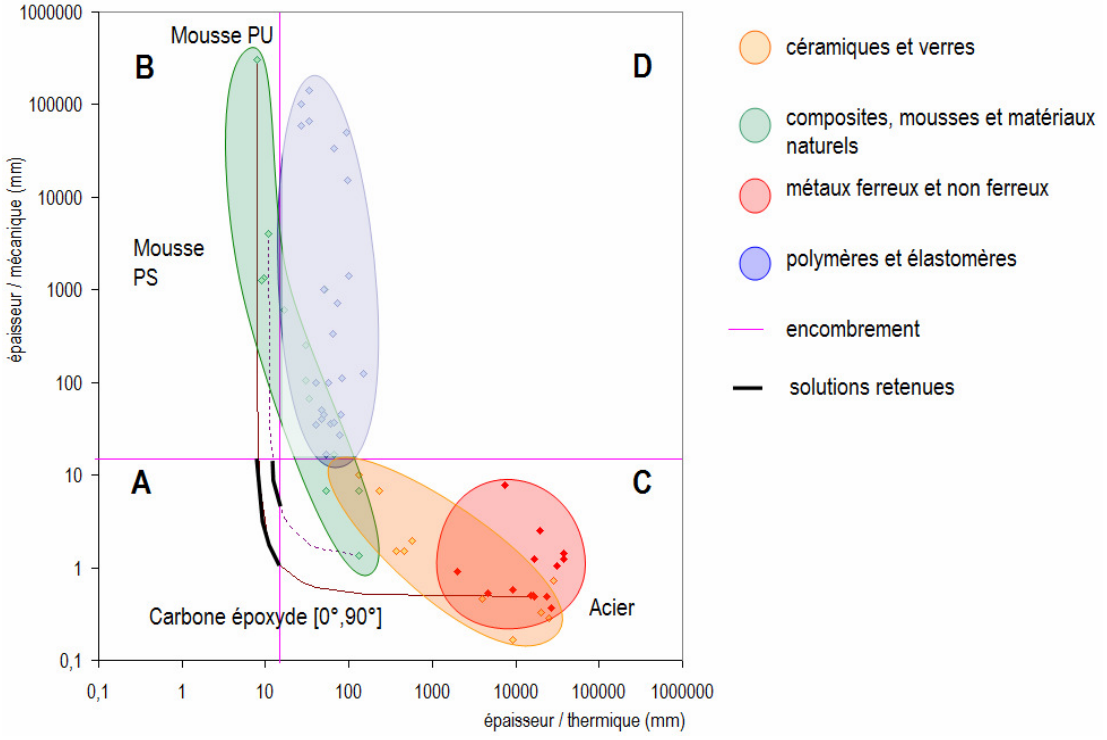


Figure 3-9 : Filtrage des combinaisons admissibles

Ce filtrage doit être effectuée sur les 150 couples de constituants admissibles.

D] Optimisation des épaisseurs et Classement des solutions

On cherche la combinaison de matériau qui minimise la masse de la poutre, la meilleure combinaison parmi celles situées dans le quadrant inférieur gauche de la Figure 3-9. Pour une combinaison, il existe un optimum de conception qui correspond à l'intersection de la droite d'équiperformance et de la courbe de couplage (Figure 3-10). Pour la première combinaison, l'optimum de conception se trouve à 94% en volume de mousse polyuréthane, tandis que pour la seconde combinaison, l'optimum de conception est à 89% de mousse polystyrène.

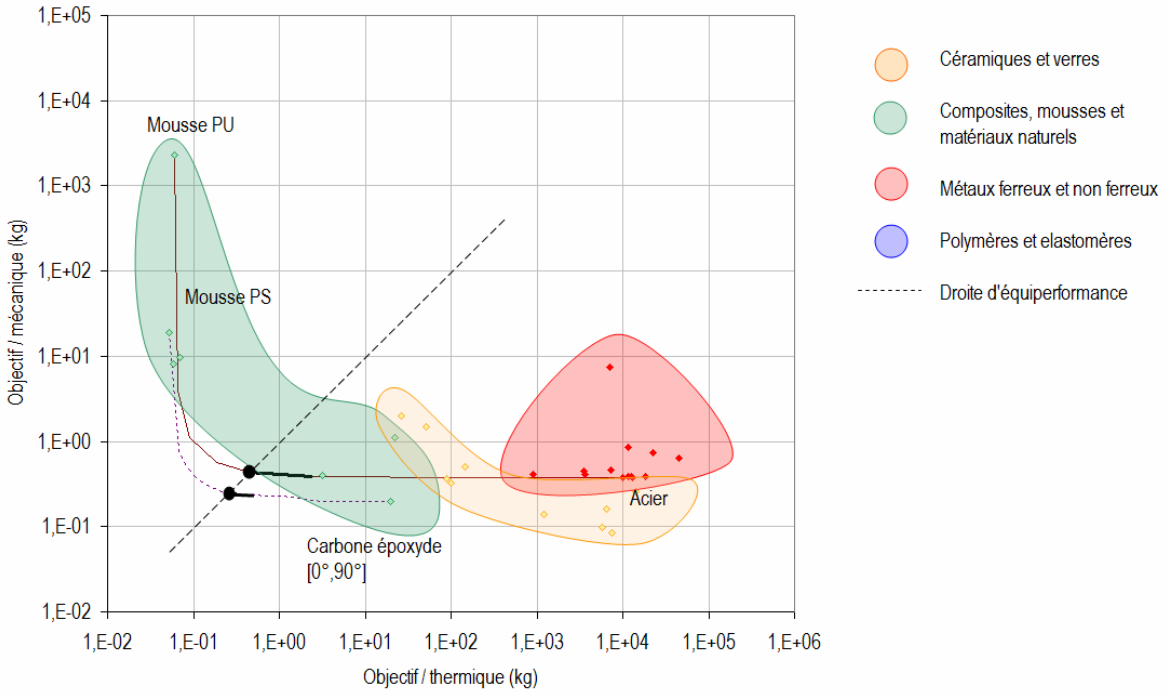


Figure 3-10 : Combinaison des constituants

Le choix s'effectue en comparant les masses des deux solutions présentées prises dans leurs configurations optimales. Pour le multimatériau acier/mousse PU, la masse trouvée est de 440 g et l'épaisseur de 12 mm tandis que pour le second multimatériau, la masse est de 248 g et l'épaisseur de 8 mm. Ce dernier est donc le plus performant. L'avantage du composite sur l'acier permet d'expliquer ce résultat d'optimisation car les performances des mousses suivant l'astreinte thermique sont quasiment identiques.

Il faut étendre cette démarche à l'ensemble des combinaisons admissibles afin d'optimiser convenablement la sélection des constituants. Il est probable, au vu de l'allure des courbes de couplage que de meilleures solutions peuvent être proposées : on peut par exemple remplacer l'acier ou le composite par un élément de la classe des verres et céramiques (Figure 3-10).

Ce chapitre a permis d'illustrer le déroulement de la démarche de conception d'un

multimatériau sur un cas élémentaire. L'exemple a mis en évidence l'utilité de ce type de matériaux pour résoudre un problème de conception aux multiples fonctions. La suite logique est alors de chercher à étendre cette procédure pour pouvoir traiter le problème industriel.

Nous établirons les besoins de généralisation de la démarche de résolution en analysant les limites de la démarche proposée. Nous proposerons un outil. Pour cela, nous présenterons un rapide état de l'art de la technique de programmation par satisfaction de contraintes. Nous vérifierons ensuite la cohérence de cette technique sur l'exemple élémentaire puis, dans le dernier chapitre, sur un cas industriel.

3.3.3 Extension de la démarche de résolution

3.3.3.1 Limites de la démarche de résolution du problème élémentaire

Comme nous venons de l'illustrer, la résolution du problème élémentaire est relativement aisée et intuitive. Les différentes représentations graphiques présentées montrent que l'on peut facilement suivre la démarche de conception proposée au chapitre précédent.

Toutefois, cette méthode de résolution présente plusieurs limites si on souhaite l'étendre à des problèmes de conception plus proches de la réalité. On entend par là des problèmes qui ne se limitent ni en nombre d'astreintes de conception ni en nombre de couches.

Comment prendre en compte la nature multicritère du problème de conception ? L'étape d'identification des constituants admissibles impose la détermination pour chaque matériau de l'astreinte la plus contraignante. Dans l'exemple précédent, avec uniquement deux astreintes, une résolution graphique est possible. S'il y a plus de deux astreintes, un traitement des données par informatique est nécessaire.

Comment traiter les problèmes multicouches ? L'autre problème que l'on entrevoit est lié au nombre de variables libres du problème. Dans notre problème élémentaire, on a supposé que l'architecture du multimatériau était de type multicouche. Pour ce type d'architecture, on a d'abord cherché des solutions possédant deux constituants lorsqu'il n'existait pas de solution avec un seul. Dans la situation où toutes les solutions à deux couches seraient éliminées lors du filtrage, on envisagerait alors de chercher des solutions multimatériaux à trois couches, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'une solution acceptable émerge de la procédure. Or si l'on augmente le nombre de couches, on augmente d'autant le nombre de variables libres du problème. La conséquence est une explosion certaine du nombre de possibilités à traiter.

3.3.3.2 Quelques caractéristiques du système de résolution

Il est nécessaire de préciser les attentes du système de résolution dans le contexte de

conception préliminaire et en prenant en compte les spécificités du problème de conception multimatériau, c'est-à-dire qu'il faut :

- Trouver un ensemble de solutions.

La conception doit aboutir à la représentation physique d'un produit réalisable. Or notre démarche se limite aux choix de constituants et à leur dimensionnement, les aspects liés à la fabrication du produit devant être abordés dans un deuxième temps. Au cours de la résolution, il ne faut pas être trop limitatif, le risque étant de ne pouvoir trouver aucune solution à l'issue de la sélection du procédé de mise en œuvre.

- Gérer l'explosion du nombre de possibilités à traiter.

La résolution du problème est fortement combinatoire : pour les raisons évoquées précédemment, la résolution du problème de conception nécessite la génération de solutions et le résultat doit comporter l'ensemble des solutions acceptables. Pour y parvenir, l'outil devrait autant que possible, être capable d'évaluer les solutions de manière exhaustive.

- Etre rapidement opérationnel.

La phase de conception préliminaire doit permettre de se faire une première idée du produit à réaliser. L'outil de conception doit être relativement simple à mettre en œuvre. Cette étape préliminaire demande sans cesse des ajustements, essentiellement parce que le besoin n'est pas encore correctement formalisé. Ainsi, l'outil de conception doit être rapidement opérationnel et donner des solutions dans le moins de temps possible afin de favoriser l'interactivité.

- Etre capable de gérer des variables hétérogènes.

Les paramètres de choix en conception sont très variables. Dans une situation classique de conception on peut retrouver des variables discrètes ou continues, des informations qualitatives (traduites sous forme booléenne).

L'ensemble de ces caractéristiques représente les attendus du système de résolution que l'on va chercher par la suite.

3.3.3.3 Programmation par satisfaction de contraintes

Domaines d'application et définition

La programmation par satisfaction de contraintes est un mode de programmation offrant à l'utilisateur un cadre et un ensemble de méthodes pour définir un problème de façon déclarative en termes de contraintes à satisfaire. La résolution est prise en charge par un solveur de contraintes.

Cette technique a largement investi le monde industriel dans lequel on rencontrait régulièrement des problèmes exprimés en termes de contraintes. Les applications sont

nombreuses et dans des domaines aussi variés que la bioinformatique, la planification de la production, la conception ou encore la robotique. Yannou [YAN01] rappelle que cette technique a connu de nombreuses applications pratiques vers le milieu des années quatre vingt dix alors que les développements théoriques avaient vu le jour quinze ans auparavant. Ce succès provient également du fait que cette technique est adaptée à la résolution de problèmes de nature fortement combinatoire, c'est-à-dire que pour parvenir à un résultat, il sera nécessaire de considérer un nombre très important de cas.

La résolution de problèmes de satisfaction de contraintes repose sur une ou plusieurs techniques appelées programmation par satisfaction de contraintes (PSC). Sans rentrer dans des détails trop spécifiques, on notera que l'on distingue deux types de techniques : les techniques de résolution et les techniques d'optimisation. Les PSC dits standards incluent des méthodes « complètes » c'est-à-dire qu'elles explorent la totalité de l'arbre de recherche de solutions.

Un problème de satisfaction de contraintes peut être défini, de façon formelle, comme un triplet (V,D,C) où : V est un ensemble de n variables V_i avec i=1,…,n ; D est un ensemble de n domaines finis de valeurs pour chaque variable, D_i, tels que $V_i \in D_i$ avec i=1,…,n ; C est un ensemble de p relations appelées contraintes C_j avec j=1,…,p.

Une solution est un n-uplet de valeurs a_i avec i=1,…,n où chaque valeur $a_i \in D_i$ respecte simultanément toutes les contraintes de C.

Intérêts et limitations en conception préliminaire

La programmation par contraintes a fait l'objet de nombreuses recherches et d'applications opérationnelles. Certains auteurs se sont penchés sur la pertinence de cette technique appliquée à des degrés divers pour la mise en place d'outils d'aide à la conception.

Ils évoquent tout d'abord les intérêts de cette technique :

(+) Prise en compte avantageuse de la diversité des contraintes d'ingénierie au sens du cahier des charges fonctionnel [VER04]. Scaravetti [SCA04] cite Janssen qui montre que les contraintes fournissent un formalisme adéquat à l'énoncé des spécifications d'un problème de conception.

(+) Garantie de la cohérence des choix de conception. La résolution d'un PSC repose sur l'affectation d'au moins une valeur à chaque variable du problème. La cohérence de la résolution du problème réside dans le fait que les contraintes ne sont pas violées si chaque variable prend une valeur en restant dans son domaine de définition. De ce fait, l'utilisateur a l'assurance, à tout moment du processus, que les solutions proposées sont cohérentes avec l'énoncé du besoin. [OUD03] [VAR05] [FRO94].

(+) Réduction du temps de résolution des problèmes. La programmation par contraintes

permet de réduire considérablement le temps de développement et de mise au point des programmes. Cette technique est adaptée au changement rapide de besoins [FRO94].

(+) Examen des domaines de solutions. La programmation par contraintes a l'avantage de pouvoir fournir des solutions inédites ou d'établir qu'un problème ne possède pas de solutions [VAR05].

Mais il y a également des inconvénients :

(-) Le problème de conception doit être cohérent avec l'écriture par contrainte. Pour évaluer une solution, on devra respecter une syntaxe et seuls les modèles analytiques sont utilisables dans les techniques de PSC standards.

(-) Pour les problèmes complexes, un trop gros volume de données peut poser des problèmes de taille de mémoire et de performances [FRO94]. Il est donc nécessaire de disposer de modèles parcimonieux [SCA04].

(-) La prise en compte de l'imprécision en contexte de conception préliminaire est un enjeu important et le cadre classique de la programmation par contraintes n'apporte aucun instrument particulier pour représenter et traiter l'incertitude [MUL00], [BEN00], [MUL01].

Synthèse et ouverture

Le rapprochement du domaine de la programmation par contraintes et des méthodologies de conception a fait l'objet de nombreuses études comme le rappelle Vareilles [VAR05]. Ces contributions portent soit sur le développement d'une nouvelle démarche de conception, soit sur l'amélioration des techniques de programmation. Notre approche consiste à utiliser les techniques existantes pour trouver un ensemble de solutions au problème de conception. Il s'agit, à notre connaissance, d'une première approche du problème de sélection des constituants du multimatériau par la voie des PSC. Notre objectif premier est de vérifier par application sur un cas industriel, la faisabilité d'un tel outil. Nul doute que des améliorations pourront être proposées au chapitre des perspectives.

Notre approche se place dans le cadre de la proposition d'une méthode et d'outils associés pour résoudre un problème de conception à l'étape de la sélection des constituants du multimatériau. Les techniques de PSC sont alors employées pour guider le concepteur à travers le processus de caractérisation du produit. L'outil de PSC doit permettre de déterminer un ensemble de solutions admissibles.

3.3.3.4 Mise en œuvre de l'outil sur le cas d'école

Nous souhaitons vérifier que les solutions déterminées par la méthode graphique et les solutions trouvées par PSC sont identiques. Un programme de calcul a été mis en œuvre pour

réaliser l'analyse sur le cas d'école (Annexe II). La structure du programme se présente en trois blocs. Les *variables* sont définies (sous forme d'entiers) sur leurs *domaines de variations* respectifs. Dans un premier bloc on retrouve les données matériaux (masse volumique, module d'élasticité et conductivité thermique), les requêtes fonctionnelles (raideur, coefficient d'échange thermique et épaisseur maximale admissible) et les dimensions de la poutre fixée (largeur et longueur). L'épaisseur et la fraction volumique des matériaux varient sur leurs domaines respectifs. Dans un second bloc, on définit les relations entre les variables. On fait l'hypothèse que toutes les couches participent à la satisfaction de l'ensemble des astreintes. On utilise alors des modèles de couplage qui intègrent dans leur formulation les propriétés et la proportion de chaque constituant ainsi que les dimensions et les requêtes fonctionnelles. Le troisième bloc contient les *contraintes du problème* à savoir, le respect de la raideur minimale, du coefficient d'échange thermique maximal et de l'épaisseur maximale.

Pour mettre en œuvre cette technique de programmation, nous avons choisi d'utiliser le solveur ECL^{i}PS^e [CHE06]. Il inclut la technique standard de résolution qui permet de balayer intégralement l'espace de solutions.

La première étape de la démarche est la recherche de solutions monomatériaux. Aucune solution de ce type n'ayant été trouvée, la résolution du problème de conception du bimatériau aboutit à 119 configurations distinctes (c'est-à-dire autant de couples de matériaux distincts) et avec les paramètres géométriques plus de 23000 solutions au problème.

Ce dernier résultat n'est pas surprenant et dépend essentiellement de la finesse avec laquelle on discrétise les domaines de variations des variables d'épaisseur et de fraction volumique. On a utilisé un incrément de un millimètre pour l'épaisseur et de 1% pour la fraction volumique. Avec un incrément de 5%, il y a toujours 119 configurations distinctes mais l'espace de solution est réduit d'un facteur cinq. En fait, le choix du niveau de discrétisation dépend du niveau de précision souhaité.

L'espace de solutions contient des configurations qui comportent systématiquement des mousses polymères. Les matériaux associés à ces mousses proviennent majoritairement des métaux et de leurs alliages (59%), ensuite il y a les verres et les céramiques (34%) et enfin des composites et matériaux naturels (7%).

Les deux méthodes de résolution (analyse graphique et PSC) donnent des résultats qui doivent être comparés et pour réaliser cette comparaison, on utilise la performance des solutions obtenues, c'est-à-dire la masse des multimatériaux. On analyse en particulier l'espace de solutions obtenu pour le couple de matériaux acier et mousse polyuréthane. La Figure 3-11 donne une représentation graphique du résultat des deux méthodes de résolution. Les solutions sont

représentées en fonction de leurs masses et leurs épaisseurs. Les solutions obtenues par la méthode de programmation par satisfaction de contraintes sont représentées par des points bleus et les cercles roses représentent les solutions obtenues par la méthode graphique. La méthode de résolution par PSC donne des solutions à intervalle d'épaisseur régulier ce qui est une conséquence directe du choix de discrétisation.

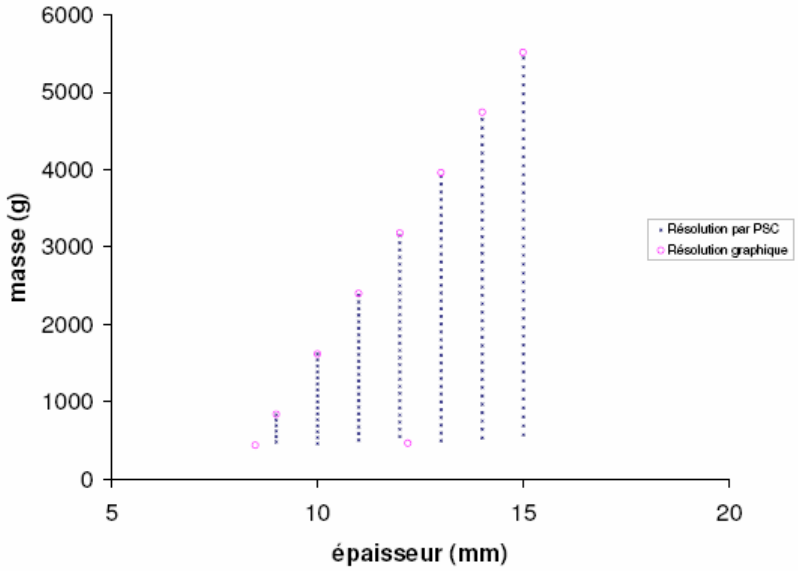


Figure 3-11 : Les solutions pour le couple acier - mousse polyuréthane.

Toutes les solutions ne seront pas retenues car elles n'offrent pas la même performance. On passe alors à la recherche de l'optimum de conception selon l'objectif de masse spécifié dans le cahier des charges fonctionnel : dans le cas présenté, la solution la plus performante se situe en bas à gauche de la Figure 3-11.

Pour chaque méthode on obtient des optimums de conception (Tableau 3-2). Malgré une définition différente du problème, les résultats sont cohérents d'une méthode à l'autre.

Tableau 3-2 : Solutions optimales pour le couple acier - mousse polyuréthane

		PSC	Graphique	Ecart selon la méthode
Epaisseur	mm	10	8,5	+15%
Proportion de mousse	%	95	94	+1%
Raideur	$N.m^{-1}$	$10{,}2.10^{6}$	$10{,}5.10^{6}$	-3%
Coefficient d'échange	$W.m^{-2}.K^{-1}$	2,53	2,97	-18%
Masse	g	461	440	+5%

En comparant les résultats obtenus, on constate que les méthodes donnent des résultats comparables car l'écart sur la masse est de 5% selon la méthode. En fait, pour un couple de

matériau donné, la méthode graphique conduit directement à l'optimum de conception car il se situe à l'intersection entre la droite d'équiperformance et la courbe du multimatériau. Lorsque l'on utilise la méthode par satisfaction de contrainte, il serait nécessaire de mieux discrétiser les domaines de variation des variables de conception (épaisseur et fraction volumique) afin de réduire l'écart constaté entre les méthodes. Cette opération a conduit à augmenter le nombre de solutions mais a permis de faire converger les deux méthodes en obtenant un écart sur la masse de moins de 1%.

Pour le couple de constituants mousse PS/composite carbone époxyde, la comparaison des résultats selon la méthode conduit aux mêmes conclusions.

La résolution par PSC permet de traiter directement une base de donnée et, selon la finesse de discrétisation des variables de conception, cette méthode conduit au multimatériau le plus performant. Dans l'exemple traité, il s'agit d'une combinaison entre une céramique et une mousse polymère. Ce couple carbure de silicium /mousse méthacrylate atteint la masse le 148 grammes pour une épaisseur totale de 11 millimètres et une fraction volumique de mousse de 97%.

Toutes les solutions acceptables ont pu être classées. Sur cet ensemble, on constate qu'au moins un des constituants est une mousse polymère. Ce résultat peut être vérifié de manière graphique : seul ce type de matériau est présent dans le quadrant B de la Figure 3-9.

Le classement des solutions obtenu par PSC selon l'objectif de performance permet de dégager certaines tendances. Les vingt premières solutions associent une mousse polymère à une céramique. Pour ces solutions la masse évolue entre 148 et 254 grammes. Les cinq solutions suivantes associent une mousse et un matériau composite carbone époxyde. Pour ces solutions, la masse de la poutre évolue peu (entre 264 et 286 grammes). La première solution associant une mousse polymère à un métal est positionnée à la 36ème place de ce classement avec une masse de 429 grammes.

Cette application sur le cas d'école confirme que l'outil PSC offre un moyen objectif pour sélectionner les constituants d'un multimatériau. Il faut pour cela avoir fixé l'architecture du multicouche et déterminé les modèles de comportement couplé. L'outil PSC permet de prendre en compte l'ensemble des contraintes du problème et le post traitement de l'information permet d'extraire de cet ensemble les solutions optimales.

Une fois le problème correctement formulé (déclaration des contraintes, des modèles et du domaine de variation des variables du problème), l'outil PSC conduit à un ensemble de solutions admissibles. La force de l'outil tient dans la flexibilité du système. En effet, si le niveau

d'exigence des astreintes évolue (situation fréquente au stade préliminaire de la conception), le concepteur peut rapidement proposer un nouvel ensemble de solutions correspondant au problème actualisé. Une attention particulière doit être portée sur la définition des domaines de variation des variables. Un équilibre doit être trouvé par l'utilisateur entre le niveau de précision souhaitée et la finesse de résolution tout en gardant bien à l'esprit qu'une explosion de l'espace de solutions n'est jamais souhaitable.

3.4 CONCLUSION

La bibliographie a montré que la recherche d'une solution multimatériau à un problème de conception donné doit suivre un processus précis. Le point de départ d'une démarche de ce type nécessite d'établir l'opportunité d'engager la conception dans cette voie. Nous avons proposé de revenir sur une démarche de sélection de matériau pour la conception de produit monolithique. Ce rappel de la méthode d'Ashby est nécessaire car il permet d'introduire des notions importantes sur lesquelles nous nous appuyons pour proposer une démarche de conception multimatériaux.

Les premières étapes d'un projet conditionnent fortement son succès. Les méthodes de conception viennent supporter le travail de l'ingénieur en lui proposant des outils adaptés selon son activité et selon le degré d'avancement du projet. Dans ce chapitre, nous proposons une procédure de conception de multimatériau exploitable à l'étape préliminaire. Les paramètres d'entrée rassemblent d'une part, les informations contenues dans le cahier des charges fonctionnel et d'autre part, les informations sur les matériaux issues d'une base de données. L'architecture du multimatériau étant définie, la méthode de conception devient une méthode qui permet au concepteur de sélectionner des constituants du multimatériau et ensuite de dimensionner la structure multimatériau. Enfin, notre démarche repose sur :

- une description précise de l'objet à concevoir (connaissance des variables de conception),
- un processus d'élimination progressive des solutions non cohérentes (par comparaison avec les astreintes de conception contenues dans le CdCF, garantie d'une conception objective),
- une évaluation systématique des solutions retenues,
- une analyse des solutions et un choix (comparaison entre les solutions pressenties).

La nature du problème à résoudre est fortement combinatoire. Après une étude simple présentée de façon classique, nous avons ensuite utilisé un outil informatique de PSC pour explorer le domaine de solutions admissibles. L'intérêt d'un tel outil est double : il facilite le travail de l'ingénieur et permet de proposer de façon systématique et objective l'ensemble des

solutions au problème de conception. L'application de cet outil à un cas d'école ouvre en particulier une piste pour la résolution du problème industriel de conception de conduite pour l'offshore.

Dans le prochain chapitre, nous présentons le problème industriel de canalisations sous-marines. Après l'établissement du cahier des charges fonctionnel, nous appliquerons la méthode de conception et les outils proposés dans ce chapitre.

4 VALIDATION DE LA DEMARCHE APPLIQUEE A LA CONCEPTION DE CONDUITES SOUS-MARINES

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons quelques problèmes liés à l'exploitation de réserves pétrolières offshore situées en ultra grande profondeur. Nous verrons en particulier que l'augmentation de la profondeur d'eau ne permet pas d'exploiter aisément ce type de ressources.

On analyse ensuite les différents systèmes interagissant au cours de la construction et de l'exploitation d'une installation offshore. On entend ici par « système », la plateforme fixe ou flottante, le réseau de canalisations sous-marines, les navires de pose, le milieu marin et enfin le fluide convoyé (pétrole, gaz, eau et autres). Le résultat de cette analyse mettra en évidence que l'on pourrait plus facilement exploiter les ressources de l'offshore ultra profond en reconsidérant certains choix de conception ; en particulier, nous verrons que la conception des conduites sous-marines est actuellement basée sur un choix de matériaux trop restreint.

Les difficultés spécifiques introduites par l'utilisation de ces matériaux en mer ultra profonde sont évoquées dans ce chapitre, en insistant particulièrement sur les aspects mécaniques liés à la pression hydrostatique ainsi que sur les aspects thermodynamiques liés à la gestion de la veine fluide sans oublier les contraintes associées à la méthode de pose.

La conception des différents types de conduites obéit à des critères spécifiques à leur application mais il est pourtant envisageable, à une étape préliminaire de la conception, d'en donner une description fonctionnelle commune. C'est l'objet de ce chapitre de proposer une analyse fonctionnelle des conduites offshore. L'analyse, volontairement générale, sert de point de départ à cette application de la méthode de conception dont l'ambition est de proposer une approche commune aux différents types de conduites. La suite de l'étude se focalise sur le cas particulier des lignes de production en vue d'une validation de l'approche proposée.

4.2 POSITION DU PROBLEME

4.2.1 Présentation d'une exploitation offshore

Une exploitation offshore (Figure 4-1) est destinée à récupérer les hydrocarbures contenus dans les roches du réservoir situées sous le fond marin. Les hydrocarbures sont acheminés par un réseau de conduites sous-marines depuis la tête de puits jusqu'à l'unité de surface (fixe ou flottante) tandis qu'un réseau parallèle véhicule de l'eau ou du gaz pour maintenir le réservoir à un

niveau de pression suffisant. Des ombilicaux, assemblages de composants électro-hydrauliques, sont utilisés pour le contrôle et la mise en opération des équipements sous-marins comme les têtes de puits, les collecteurs, les vannes, les pompes sous-marines ...

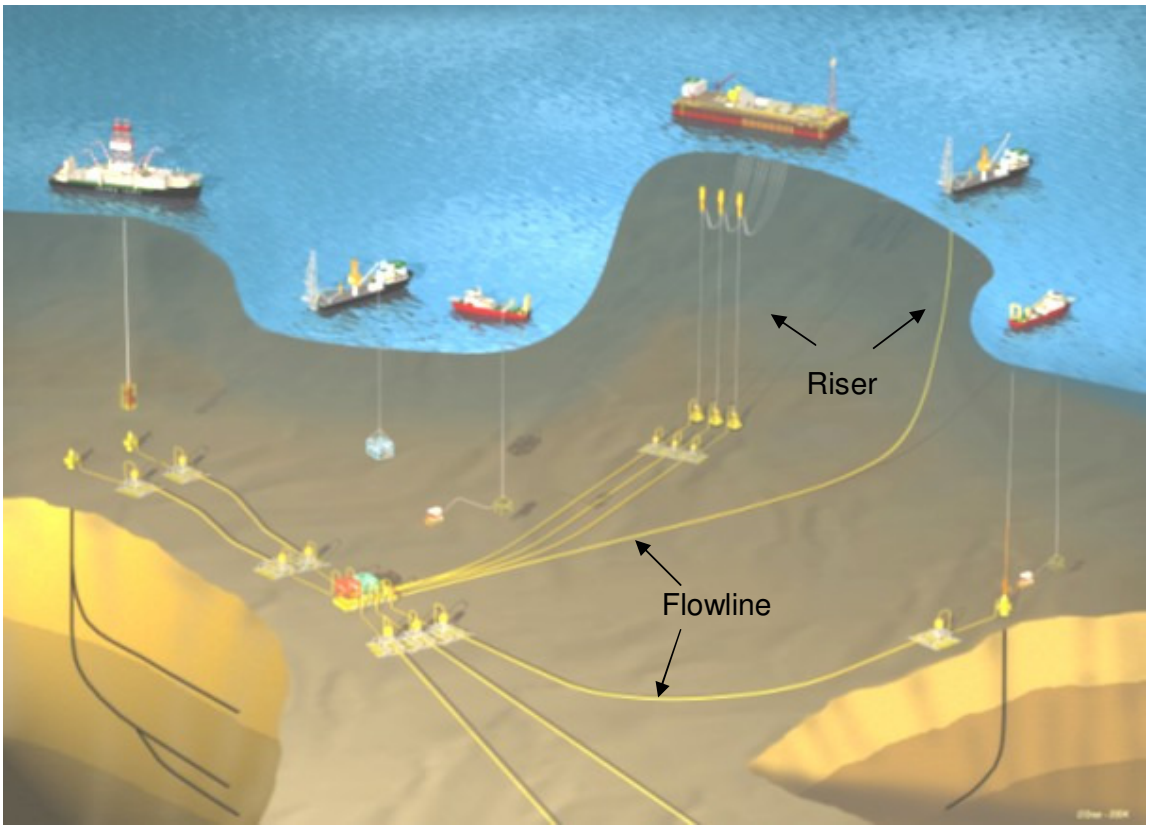


Figure 4-1 : Représentation schématique d'une exploitation offshore (source SAIPEM)

Avec l'essor des développements pétroliers en grande profondeur, les conduites sous-marines ont pris une importance technologique considérable. Il existe une multitude de conduites sous-marines et les trois principaux critères de classification sont :

- le type de fluide transporté (huile brute, huile morte, eau, gaz),
- les points du réseau reliés (les « risers » réalisent la liaison fond-surface, les « flowlines » parcourent le fond marin),
- la fonction principale assurée (ligne d'injection, de production ou d'export).

De plus, les schémas de développement ou concepts d'architecture sous-marine varient selon les zones géographiques et l'expérience spécifique des opérateurs pétroliers, ce qui explique la grande diversité des solutions technologiques utilisées.

Parmi les technologies de conduites sous-marines, on retiendra les conduites rigides traditionnelles, en simple ou double enveloppe, ou bien assemblées en faisceau, ainsi que les conduites flexibles. Ces dernières, création originale de l'Institut Français du Pétrole (IFP), sont

constituées de couches concentriques en matériaux polymères thermoplastiques extrudés et de nappes de fils d'acier enroulés en hélice : comme pour les conduites rigides classiques, le dimensionnement de ces conduites repose sur les conditions opératoires requises, en particulier relatives aux fluides transportés (pression, température, composition chimique).

4.2.2 Problèmes de l'offshore ultra profond

La mise en production de champs d'hydrocarbures allant jusqu'à 2000 mètres de profondeur est aujourd'hui correctement maîtrisée par les opérateurs pétroliers. Ainsi ce type de ressource tend à devenir conventionnel. Le défi actuel se situe au-delà de 2000 mètres, domaine de l'offshore ultra profond. Dans ces zones, les opérations d'exploration et de forage ont montré l'existence de quantités considérables de réserves. Les zones géographiques concernées sont situées dans le golfe de Guinée, le golfe du Mexique et au large des côtes brésiliennes.

L'exploitation de ces ressources va demander des investissements considérables et les innovations seront nécessaires pour franchir certains paliers techniques et diminuer les risques. Ces avancées sont à la mesure des problèmes de développement liés aux contraintes mécaniques et thermiques accrues en ultra grande profondeur. De façon très générale, l'augmentation du poids et la gestion de la veine fluide sont aujourd'hui les principaux points techniques au centre des développements ultra profonds. Par ailleurs, sans établir une liste exhaustive des autres problèmes techniques en offshore, on peut mentionner les problèmes de fatigue et de corrosion.

Ainsi, le poids est un des éléments pénalisants pour les développements en offshore ultra profond et, pour certaines lignes comme les risers, cette contrainte doit être intégrée à toutes les étapes du cycle de vie de la canalisation. Pour d'autres lignes telles que les flowlines, le critère de poids n'affecte que la phase d'installation de la ligne.

En suivant la logique chronologique du cycle de vie d'un produit, le concepteur doit tout d'abord veiller à respecter les contraintes d'installation imposées par les capacités de pose des navires. Pour installer une ligne, les sociétés spécialisées disposent de navires usines capables de poser des charges pouvant atteindre 800 tonnes. Pour aller plus profond, on imagine une modification des équipements des navires existants ou encore la construction de nouveaux bateaux de pose. Les investissements liés à ces solutions sont considérables et se chiffrent, selon l'option choisie, entre quelques dizaines et plusieurs centaines de millions de dollars.

Ensuite, il est nécessaire de connaître l'impact d'une augmentation du poids lors de la vie en service de la canalisation. Pour certaines structures de surface telles que les plateformes tendues (TLP, *Tension Leg Platform*) la tension due au poids apparent des canalisations qui lui sont

attachées doit être limitée. En effet, les charges supplémentaires doivent être compensées par des systèmes de flottabilité très coûteux.

Par conséquent le poids apparent des canalisations affecte directement le coût de pose et/ou le coût des installations offshore. Pour rester compétitif, il faut imaginer des solutions alternatives qui soient économiquement plus rentables que les solutions déjà énoncées (augmentation de la capacité de pose et des systèmes de flottabilité). Parmi les solutions envisageables, on peut supposer que l'allègement des canalisations peut être une alternative intéressante aux solutions proposées.

Outre le problème de poids, la gestion de la veine fluide (*Flow Assurance*) est une activité en plein essor dans le domaine de la conception de canalisations de transport d'hydrocarbures en offshore. Cette discipline relativement récente porte sur le suivi des conditions de circulation des hydrocarbures en phase de service, d'arrêt de production (accidentel ou programmé) et de redémarrage. L'objectif est d'assurer la continuité du transport d'hydrocarbures quelle que soit l'opération réalisée sur le réseau de canalisations sous-marines. En considérant qu'un champ majeur produit des centaines de milliers de barils par jour, on imagine aisément qu'un tel blocage est inacceptable pour un opérateur.

Les raisons de blocage des canalisations sont liées à la nature physico-chimique des hydrocarbures fossiles. Ce sont des mélanges multiphasiques sensibles aux variations de pression et de température. La présence simultanée d'eau et de gaz provoque des bouchons (hydrates de méthane) dans certaines conditions de pression et de température. Ce phénomène est connu dans l'industrie pétrolière sous le nom de « risque hydrate ». Un autre phénomène, plus lent et continu que la formation d'hydrate mais également lié à la composition des hydrocarbures est le dépôt de paraffines également sensible aux variations de température et de pression.

La formation d'hydrates de gaz peut intervenir lors des arrêts ou des redémarrages des lignes de production. Au cours de ces opérations, les conditions parfois défavorables sont réunies car la pression est élevée et la température faible. Pour limiter le risque hydrate, les opérateurs pétroliers privilégient les techniques de prévention car une fois formés, les hydrates de gaz sont très difficiles à dissocier. Pour cela, on prévoit de réaliser des opérations de préservation qui consistent à remplacer les fluides de production par de l'huile morte et on conçoit les lignes de telle sorte que la quantité de chaleur emmagasinée dans le matériau constituant la paroi de la canalisation en régime de transport établi permette de limiter les pertes thermiques lors d'un arrêt.

La gestion des dépôts de paraffine est organisée autour d'opérations de remédiation qui sont plus efficaces que les techniques de prévention (comme l'injection d'inhibiteurs chimiques). On utilise des racleurs pour nettoyer périodiquement les dépôts de paraffines. Si la circulation du

fluide s'effectue à une température suffisante, le dépôt de paraffine sera correctement contrôlé et un raclage régulier sera suffisant.

La gestion de la veine fluide entraîne, à l'étape de conception, de nouvelles contraintes sur la philosophie de production, l'architecture du réseau de canalisation et sur le choix des matériaux constituant la paroi. Ces contraintes sont liées au comportement thermodynamique du fluide de production transporté et, pour garantir une circulation correcte, il faut disposer, entre autres choses, de matériaux capables de restituer la chaleur en fonction de la phase de production.

Pour résumer ce point sur les problèmes de l'offshore ultra profond, on peut rappeler que la gestion du poids des installations offshore et du transport multiphasique des hydrocarbures sont des éléments déterminants auxquels l'industrie parapétrolière doit faire face. Ces contraintes sont directement liées à la profondeur d'eau et on peut prédire raisonnablement que leur impact sera d'autant plus marqué.

Pour faire face à ces enjeux, il n'y a pas qu'une seule réponse et certaines solutions abordées dans ce paragraphe peuvent être envisagées pour l'avenir. Entres autres choses, l'augmentation des capacités des navires de pose est un sujet déjà à l'étude dans l'industrie. Nous dressons un bilan plus détaillé des possibilités dans le prochain paragraphe.

4.2.3 Les voies de recherche et développement

Le domaine de l'Exploration-Production regroupe les opérateurs pétroliers, les grandes sociétés d'ingénierie et les fournisseurs d'équipements spécifiques. Une société comme SAIPEM assure la réalisation de contrat EPCI (Engineering, Procurement, Construction, Installation). Elle réalise l'ingénierie, les achats, la construction et l'installation de toutes les installations offshore depuis la tête de puits jusqu'au navire de récupération. C'est une prise en charge complète, de l'étude à la réalisation de tous les systèmes nécessaires à la mise en production d'un champ offshore. Pour réaliser ces contrats clefs en main, elle dispose d'implantations locales sur tous les continents, d'une flotte de navire de pose et de plusieurs centres d'ingénierie.

La relation entre un opérateur pétrolier et une société d'ingénierie et de construction est gérée au niveau contractuel par un ensemble de règles et la mission de SAIPEM est de répondre aux attentes du client spécifiées dans le cahier des charges. Pour simplifier la présentation de l'offshore profond, on peut dire que l'opérateur pétrolier fournit des indications sur le type de fluide à transporter, la profondeur et les conditions environnementales (Figure 4-2). Une société de service parapétrolier comme SAIPEM a la responsabilité de fournir l'ensemble du réseau de canalisation et les moyens de pose associés.

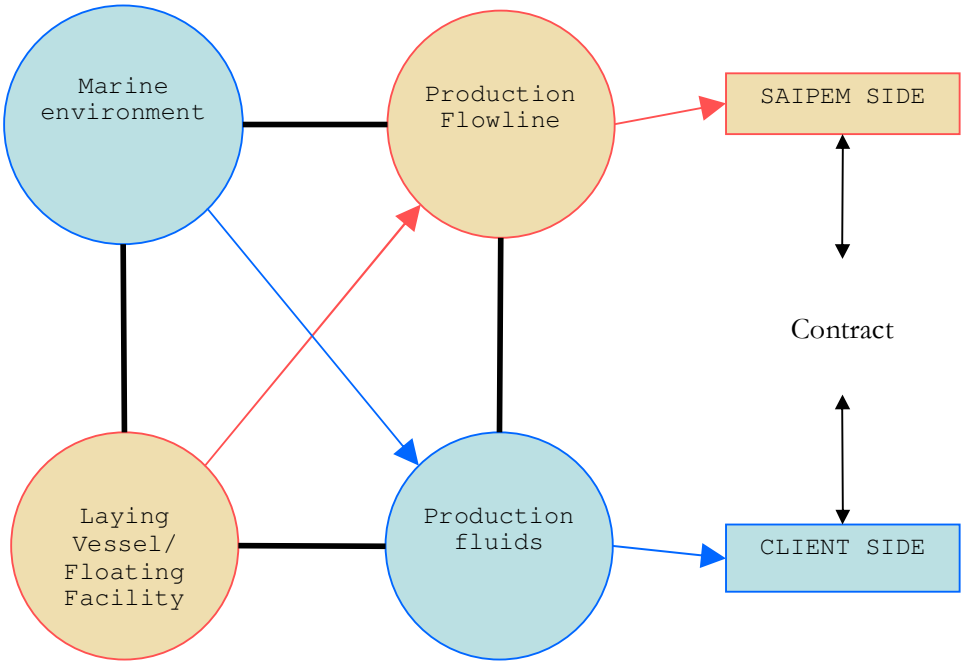


Figure 4-2 : Répartition des rôles entre un opérateur et une société d'ingénierie

On constate que l'évolution du marché et son dynamisme lié au besoin de répondre à une demande croissante en pétrole ouvrent plusieurs voies de développement. Ainsi, pour résoudre les problèmes liés à l'offshore ultra profond, l'ensemble de la filière d'Exploration et de Production pétrolière évalue différentes alternatives et avance en fonction de la maturité des nouvelles technologies, des risques industriels et des coûts des différentes solutions.

Une analyse systémique, comme celle résumée en Figure 4-2, offre un support pour comprendre les différentes voies de recherche et développement envisagées. Cette figure montre les sous-systèmes interagissant dans une exploitation pétrolière offshore : il y a les supports de surface (navire de pose et de récupération du brut), les canalisations sous-marines, les fluides produits (ou nécessaires en opération) et la mer. L'idée est de considérer chaque sous-système dans le complexe global, et ensuite d'évaluer si la modification de l'un des sous-systèmes peut permettre de répondre aux défis de l'offshore ultra profond. On notera qu'il y a un sous-système invariant et avec lequel il faudra composer, c'est l'océan.

Tout d'abord nous avons insisté dans la section précédente sur les aspects de modification et/ou de construction de nouveaux navires de pose qui permettrait d'envisager de plus fortes capacités de tensionnement et ainsi permettrait d'augmenter la profondeur de pose. Pour compléter cette voie, on peut imaginer le développement de système d'aide à la pose. Ces systèmes consisteraient par exemple à greffer des modules de flottabilité temporaires sur les

canalisations. La modification des moyens ou des méthodes d'installation impose toutefois une charge financière importante pour l'installateur de canalisations que ce soit en termes d'investissements ou de coûts opératoires.

Une autre voie en fort développement à l'heure actuelle englobe les solutions de séparation sous-marine. On travaille directement sur le fluide de production. Le principe est de traiter les hydrocarbures directement au fond de la mer, et ce, au plus près de la tête de puits. Les avantages de la séparation sous-marine sont nombreux car les hydrocarbures débarrassés de l'eau sont bien plus faciles à transporter ; on peut réinjecter directement le gaz et l'eau produits qui sont nécessaires au maintien de la pression dans le réservoir ; on limite les éléments de process et de stockage en surface ce qui entraîne une diminution sensible de la taille des supports flottants. On économise enfin sur la taille des canalisations, ce qui contribue à limiter le problème de poids. En contrepartie, il faudra compter sur certaines avancées technologiques, avec en particulier l'amélioration de la fiabilité des systèmes sous-marins et la capacité des pompes et autres éléments de process à fonctionner en mer très profonde.

Enfin, nous pouvons souligner une dernière voie de développement, celle-là même que nous avons choisi de suivre dans cette étude. Cette voie consiste à reconsidérer le choix de l'acier comme matériau de construction des canalisations sous-marines. L'acier est un matériau omniprésent en construction offshore. Il est clair que ce matériau apporte de nombreux avantages : c'est un matériau facilement formable, disponible sur tous les continents, les techniques d'assemblage par soudage sont bien connues et, c'est un matériau utilisé de longue date ce qui en facilite l'usage car les ingénieurs ont un recul suffisant pour prédire son comportement à long terme. Enfin, un dernier argument important est son faible coût d'achat. Et malgré la forte augmentation du coût d'approvisionnement de ces dernières années (plus du double en trois ans), l'acier est encore considéré comme un matériau bon marché. Cependant, malgré toutes ces qualités, ce matériau n'est plus en accord avec les besoins de l'offshore ultra profond. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer les sociétés de pose de canalisation qui se voient aujourd'hui dans l'incapacité de répondre à certains projets en ultra grande profondeur. Il faut donc dépasser ce choix. Il y a alors un intérêt à étudier de nouvelles solutions matériaux pour la conception de canalisations sous-marines.

Un arbitrage est régulièrement réalisé par les acteurs de la filière parapétrolière afin de déterminer quelle voie de développement doit être privilégiée : la séparation sous-marine, l'amélioration des moyens et des méthodes de pose ou la reconception de canalisations sous-marines. Ces orientations stratégiques sont du ressort de l'entreprise et nous ne les discutons pas.

Sur un plan purement technique, il semble naturel de remettre en cause le choix de l'acier. Ce choix traditionnel et quasi systématique est fortement contraignant. En effet, le poids apparent des canalisations est un paramètre de conception déterminant et il est nécessaire de lever cette contrainte pour permettre l'exploitation des ressources de l'ultra profond.

En suivant, nous verrons que la bibliographie propose de nombreuses références sur le sujet du développement de nouvelles solutions matériaux pour la construction de canalisations sous-marines. On cherchera en particulier à comprendre les raisons qui ont motivé les concepteurs à développer ces solutions alternatives. Nous verrons s'il y a une opportunité d'utiliser certains résultats, notamment sur les méthodes de conception et sur les concepts d'architecture.

4.2.4 Etude bibliographique des canalisations sous-marines de type multimatériaux

Nous abordons dans ce paragraphe les études qui portent sur l'utilisation de nouveaux matériaux dans la conception de canalisations sous-marines.

Il est difficile de donner une classification définitive des canalisations sous-marines. Il y a en effet différent critères utilisables : l'architecture de la ligne, le type de fluide transporté, les conditions de pose.

Nous nous sommes limités aux solutions dites « hautes performances », c'est-à-dire aux applications soumises à des contraintes de conception mécanique et thermique très élevées.

Les applications présentées couvrent essentiellement les canalisations rigides. A la gamme des lignes rigides, on oppose généralement la gamme des lignes flexibles. Ce dernier type de ligne s'avère très intéressant dans les applications dynamiques (c'est-à-dire pour les lignes soumises aux mouvements hydrodynamiques) ou lorsque les conditions d'installation l'imposent. Les lignes flexibles sont plutôt moins performantes que certaines solutions de canalisations rigides en termes d'isolation thermique mais il semble incontournable d'aborder cette gamme de canalisation assez spécifique dans un paragraphe destiné à présenter les canalisations de type multimatériaux.

Dans ce paragraphe, on a rassemblé quelques exemples significatifs de l'effort de recherche et développement en effectuant un classement par type d'application. Nous verrons que la plupart des canalisations ont été étudiées. Nous verrons également les raisons qui justifient la recherche de solutions alternatives. Les points de blocages seront également abordés.

Applications au riser de forage

Un riser de forage est une canalisation de grand diamètre qui relie le puits situé au fond de la mer à la surface : il permet la remontée des boues de forage à la surface. De 1979 à 1990, l'IFP et l'Aérospatiale ont développé l'utilisation des matériaux composites pour des risers de forage [SPA86]. Le principal argument était qu'avec les solutions traditionnelles (en acier), la charge en tête était trop importante. Il a été démontré que l'introduction des matériaux composites permettait d'alléger significativement le poids de la structure. De nombreuses études portant sur le vieillissement, sur la fatigue et sur la résistance mécanique ont été réalisées sur des échantillons et des prototypes fabriqués par enroulement filamentaire. Les matériaux utilisés pour ces tests étaient des composites de résine époxyde, choisie pour ses bonnes propriétés thermomécaniques, renforcée par des fibres en carbone haute résistance ainsi que des fibres de verre « S ».

Rapidement, on s'aperçoit que les connexions entre les risers sont problématiques. Il faut pouvoir diminuer la durée des opérations d'installation et améliorer le transfert de charges entre le composite et le connecteur en acier. C'est dans ce sens que la solution Clip Riser a été développée [GUE02].

Un grand tournant a été franchi en 1995 avec les programmes de développement et de qualification dirigés par Norske Conoco A.S. et Kvaerner Oilfield Products. Ces projets ont permis l'installation sur champs (Brésil et Mer du Nord) de joints de riser utilisant des multimatériaux associant du titane et des composites en résine époxyde et fibre de verre et de carbone. Le choix du titane a fortement été contraint par l'existant et il a fallu respecter cette contrainte pour réaliser et tester le démonstrateur. Une fibre carbone haute résistance a été sélectionnée pour sa bonne tenue aux actions mécaniques (pression interne, externe, tension axiale) et un pli de verre a été bobiné sur la face externe du composite carbone pour améliorer la résistance à l'impact [SAL99, SAL01].

Applications au riser de production tendu

Un riser de production est une canalisation qui relie le fond à la surface et qui ramène le pétrole brut pour être traité puis exporté. L'architecture d'un riser dépend de la plate-forme de récupération du brut et des conditions environnementales. Par exemple, pour les plateformes de type TLP[1] (Tension Leg Platform), le riser doit rester tendu pour éviter le flambement. En général, on impose une charge d'une centaine de tonnes en pied de riser. Pour ces applications, le

[1] Une TLP est une plate-forme pétrolière qui possède un excès de flottabilité et est maintenue en place par des cables tendus la reliant au fond marin.

poids apparent joue un rôle considérable [SPA86] car chaque tonne gagnée permet de limiter la tension en tête nécessaire pour maintenir le riser sous tension. Les caractéristiques élastiques des composites peuvent également être exploitées dans ce cas puisque un arrangement spécifique des fibres garantit un faible allongement du riser et simplifie le système de compensation des mouvements verticaux dus à la houle (particulièrement coûteux). Ces principes ont été mis en œuvre sur une série de projets de qualification dirigés par l'IFP entre 1985 et 1987. [SPA88] a démontré qu'il était possible de fabriquer des tubes composites hautes performances notamment grâce à des campagnes d'essais statiques (tension et éclatement) et d'essais en fatigue.

Ces projets ont servi de base à de nouveaux développements associant l'IFP et l'Aérospatiale à Coflexip et Lincoln Composites. Le but était de concevoir, développer, fabriquer et qualifier un riser de production allégé. Un effort particulier a été fourni pour trouver des solutions au meilleur coût [JOH99] [JOH02].

Les connaissances acquises au fil des années ont permis de montrer que ces concepts étaient viables techniquement et économiquement pour le domaine de l'ultra profond [BØT02] et les études se sont affinées pour s'orienter vers la prise en compte des sollicitations hydrodynamiques complexes [OST96] et la prédiction du phénomène de fatigue des matériaux composites [HUY02], [LOV97]. Enfin, un organisme de normalisation majeur, le DNV (Det Norske Veritas), a publié une norme de conception de ces nouvelles solutions favorisant ainsi leur déploiement en phase de projet [DNV03].

Autres applications

Alors que les premières études étaient focalisées sur des applications du type riser de forage ou riser de production, les besoins d'amélioration se sont ouverts à d'autres types de canalisations sous-marines :

Les risers caténaires : il s'agit d'une architecture de riser assez spécifique en fort développement depuis une dizaine d'années. Ce type de riser est simplement accroché au support flottant et pend dans l'eau en prenant la forme d'une caténaire. Les avantages opérationnels des matériaux composites sur l'acier (résistance à la fatigue, légèreté) ont été montrés et des coûts acceptables ont pu être présentés [ODR02]. Toutefois il n'existe à ce jour aucune application opérationnelle de ce type de concept.

Les lignes de sécurité : ces lignes (kill & choke) servent à actionner les vannes de tête de puits. De faible diamètre (4-6"), ces lignes fonctionnent à très haute pression (1000 bars). L'IFP a mis au point une technologie appelée « tubes frettés » pour fabriquer ces lignes. Cette technologie

permet de réduire de moitié le poids des lignes de sécurité [GUE02].

Les lignes d'injection d'eau ou de méthanol : on injecte du méthanol dans les lignes de production en cas d'arrêt pour préserver la ligne du risque hydrate. Sur le champ d'Asgard en Mer du Nord, l'idée était d'utiliser une ligne composite fabriquée par enroulement filamentaire en continu, remplaçant avantageusement les solutions aciers, sensible à la corrosion externe et présentant des points faibles localisés au niveau des soudures [MEL00]. Une ligne continue de 6,5 kilomètres, fabriquée par Compipe, a été installée par le Seaway Eagle non sans certaines difficultés.

Les procédés de fabrication en continu possèdent l'avantage évident d'éliminer les opérations coûteuses de connexion en mer [WIL00]. L'initiative de Soficar, Freyssinet, Doris et Total se place dans cette optique avec le développement d'un procédé de fabrication en continu de ligne en composite carbone et résine thermoplastique [PIC07]. Ce travail est une ouverture vers d'autres types de matériaux puisque jusqu'à présent, l'essentiel des études portaient sur des composites à résine thermodurcissable qui nécessitent une cuisson à température élevée.

Les lignes flexibles ont été conçues à l'origine par l'IFP, et Flexifrance (anciennement Coflexip) est la société qui assure l'exploitation de ces brevets. Le principe du flexible repose sur un arrangement spécifique de couches concentriques mêlant des matériaux plastiques et des matériaux métalliques. Chaque couche répond à une fonctionnalité bien précise. Par exemple, les fils d'armure assurent la tenue à la tension axiale tandis que la carcasse permet d'éviter le flambement du multicouche. Les différentes couches de plastique assurent l'étanchéité de la canalisation en limitant le phénomène de perméation des gaz dissous particulièrement corrosifs (H_2S, CO_2) et limitant la durée de vie en service [LAS02]. La flexibilité de la ligne est assurée par un glissement relatif entre les couches. C'est un critère de conception important et le rayon de courbure minimum est imposé par la déformation maximale admissible dans les couches plastiques (les seules à être continues suivant la génératrice du tube). Ce type de lignes est couramment utilisé pour les applications dynamiques notamment dans les zones de sub-surface.

Cette rapide étude bibliographique montre que l'essentiel de ces travaux a porté sur l'utilisation des matériaux composites pour des applications spécifiques de type risers. Les applications se sont ensuite orientées vers d'autres types de lignes telles que les lignes de service, les lignes d'export et les lignes d'injection.

Dans une moindre mesure, on note l'utilisation des matériaux plastiques pour la protection anti-corrosion des lignes rigides [GRO01] : tout d'abord sur des applications telles que les lignes d'injection, et ensuite plus récemment sur des applications plus contraignantes telles que les lignes de production [MAU07]. Certaines solutions passent le stade de la qualification imposé par les

opérateurs pour être proposées en projet mais avant d'y parvenir, il a fallu démontrer une maîtrise parfaite des techniques de connexions offshore afin d'assurer la continuité de la fonction anti-corrosion [BEU06]. D'une manière générale, on peut souligner qu'un nombre restreint de ces développements a pu dépasser le stade de l'étude de laboratoire.

Ces solutions nouvelles ont d'abord émergé pour anticiper les problèmes de poids dus à l'augmentation de la profondeur d'eau. Les matériaux composites ont trouvé un bon terrain d'application. Ils sont réputés pour leurs bonnes propriétés spécifiques qui dépassent par certains aspects celles des métaux. Les matériaux plastiques sont utilisés pour protéger l'acier contre la corrosion. Une pratique courante de conception consiste à ajouter une surépaisseur d'acier afin de garantir que la partie structurelle ne soit pas soumise aux agressions chimiques. Cette solution présente néanmoins un inconvénient majeur car elle augmente le poids de la canalisation dans les proportions non négligeables : pour certaines applications, les normes conduisent à des solutions qui présentent jusqu'à quarante pourcent d'acier en plus. En résumé, on peut dire que le défi de l'offshore profond et ultra profond n'est pas récent pour l'industrie parapétrolière et il a souvent été assimilé à un problème de poids.

Les études présentées dans ce paragraphe montrent que l'effort a d'abord été porté sur l'évaluation du comportement mécanique et thermique des solutions alternatives. Le choix de matériaux est le plus souvent justifié a posteriori par des modélisations parfois très poussées. Mesurant ensuite l'impact évident du choix de matériau et du procédé de fabrication sur le comportement de ces lignes, des études expérimentales ont pu être menées. De manière générale, on note que les choix de procédés de fabrication et de matériaux découlent le plus souvent de la capacité à faire plutôt que de la conception. Enfin, on constate que certaines études se sont attachées à évaluer la faisabilité économique des concepts proposés. Nous verrons dans un prochain paragraphe que ce choix de matériaux a des conséquences importantes sur le résultat de la conception selon que l'on choisisse d'optimiser le coût, la profondeur, ou les deux paramètres simultanément.

Enfin, on peut remarquer que l'ensemble des solutions actuelles présente un caractère commun : les matériaux sont systématiquement disposés sous forme de couches concentriques. Ce principe de construction est toutefois assez naturel. Il se justifie par le fait que les sollicitations et le choix de principe de solution retenu (un tube) présentent une symétrie de révolution. Ainsi, l'architecture parallèle est directement applicable au problème de conception de conduite et ceci conduit à un multicouche axisymétrique. Cette remarque suggère un point important pour la suite de l'étude car on sera en mesure d'appliquer la méthode de conception de multimatériaux multicouche proposée au chapitre 3.

Pour illustrer cette méthode, il convient de réaliser d'abord une analyse fonctionnelle afin d'établir le cahier des charges fonctionnel et ensuite de poser le problème de conception en suivant la terminologie propre à la démarche d'Ashby. Une analyse fonctionnelle des canalisations sous-marines est proposée dans le prochain paragraphe.

4.2.5 Etude fonctionnelle d'une conduite

L'analyse proposée dans ce paragraphe est non différenciée : elle conserve un caractère suffisamment général pour être applicable à toutes sortes de canalisation sous-marines. Nous nous concentrerons ensuite sur une application de conduite liée spécifiquement au besoin de SAIPEM afin d'illustrer la démarche de conception mise en avant dans cette étude.

4.2.5.1 Cycle de vie d'une conduite sous-marine

De la fabrication au démantèlement, l'étude cycle de vie permet un recensement exhaustif de toutes les situations auxquelles la conduite est soumise au cours de sa vie. Ce cycle est découpé en sept phases (Tableau 4-1).

Tableau 4-1 : Cycle de vie d'une canalisation sous-marine

Etape du cycle de vie	Description de l'étape du cycle de vie
Fabrication	Les conduites sont destinées à être installées en mer profonde. A ce niveau de l'étude le lieu de fabrication (en mer ou sur terre) n'est pas défini.
Transport	C'est éventuellement le trajet entre la terre et le site de pose en mer ; il est possible aussi d'envisager une fabrication en mer.
Stockage	Sur une barge de pose située en mer ou en flottaison avant remorquage en mer.
Installation	Cette manœuvre consiste à immerger la conduite, à assurer les connexions au réseau et à effectuer la première mise en service.
Exploitation	Prévues pour un service de 20 ans, les conduites doivent assurer le fonctionnement de l'exploitation.
Remplacement	C'est une manœuvre qui consiste à retirer une conduite défectueuse et à la remplacer.
Recyclage ou démantèlement	Devenir de la conduite après l'arrêt définitif de l'exploitation, valorisation des matériaux, recyclage des déchets.

La conception d'un produit comporte une étape de sélection du ou des matériaux (et le dimensionnement) et une étape de choix de méthode de mise en œuvre. On a longuement insisté sur les limites de l'approche séquentielle de la conception et il convient de considérer ces étapes simultanément. Cependant pour débuter la conception, il est nécessaire de fixer certains attributs du produit, et ici, on choisit d'évaluer ultérieurement le mode de mise en œuvre. L'étude se limite donc aux phases de vie d'installation et d'exploitation sans aborder en particulier la fabrication. Il faut alors déterminer et décrire l'environnement immédiat de la conduite pour ces deux phases.

On compte quatre éléments dans l'environnement immédiat de la ligne au cours des phases d'installation et d'exploitation :

- Les fluides à transporter : ils sont monophasiques (huile traitée ou eau ou gaz) ou polyphasiques (huile brute) drainant parfois des particules de roches; les propriétés fluides sont dépendantes de la composition chimique ; elles évoluent au cours du temps et sont fonction des conditions de pression et de température.
- Le milieu marin : en phase d'installation et d'exploitation les conduites sont soumises aux actions physico-chimiques de l'eau de mer, aux courants et à la houle, à la température et à la pression.
- L'installateur : selon la technique de pose choisie, les chargements imposés à la conduite vont évoluer en mode, en localisation sur la canalisation et en intensité.
- Les interfaces du réseau : les conduites doivent être connectées aux interfaces existant sur le réseau ; il faut alors différencier la partie courante des extrémités ; les extrémités doivent faire l'objet d'une étude parallèle. En conception de conduite, la première étape consiste à définir la partie courante de la conduite.

4.2.5.2 Graphe des interactions

La méthode APTE préconise l'utilisation du graphe des interactions pour recenser les fonctions d'un produit.

L'objet à concevoir est placé au centre d'un diagramme et les éléments de son environnement (environnants décrits précédemment) sont disposés à sa périphérie. Les relations entre le produit et les environnants définissent les fonctions du produit, caractérisant ainsi le service rendu. Les deux types de relations en jeu sont les fonctions principales (relation entre deux éléments parmi les environnants et passant par le produit) et les fonctions contraintes (actions imposées par les environnants sur le produit et inversement).

La Figure 4-3 montre le graphe des interactions entre la canalisation de transport offshore et ses environnants.

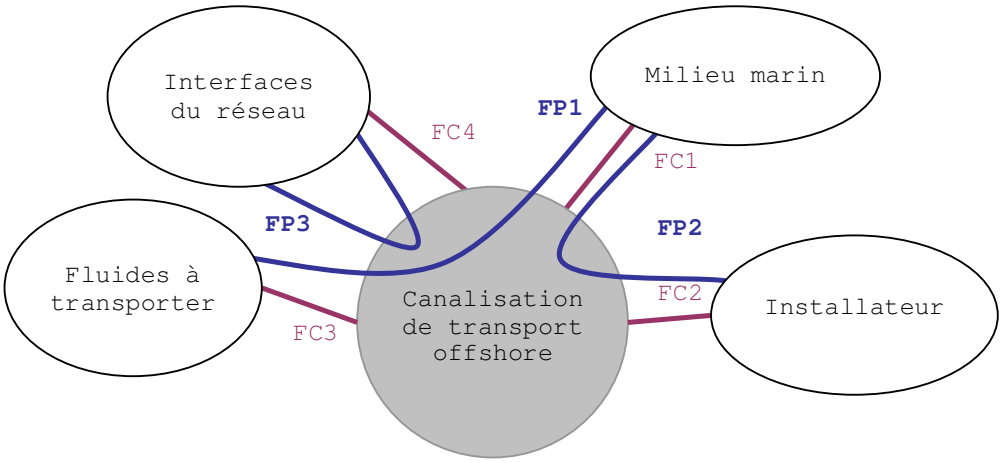


Figure 4-3 : Graphe des interactions de conduites offshore

Cette méthode permet de dégager trois fonctions principales et quatre fonctions contraintes liées à l'installation et à l'exploitation de la canalisation en milieu offshore.

A partir de cette représentation, on définit les relations entre le produit et les environnants et donc les fonctions du produit à concevoir (Tableau 4-2).

Tableau 4-2 : Fonctions principales et fonctions contraintes d'une canalisation sous-marine

Fonctions principales	
FP1	Transporter un fluide à travers un milieu
FP2	Etre installé en mer
FP3	Relier les systèmes amont et aval
Fonctions contraintes	
FC1	Supporter les conditions marines / Ne pas polluer l'environnement marin.
FC2	Supporter les conditions d'installation / Ne pas dégrader le moyen de pose
FC3	Résister aux actions des fluides transportés / Ne pas dégrader ces fluides
FC4	Etre connectable aux interfaces du réseau (compatibilité)

4.2.5.3 Décomposition logique

Les systèmes considérés dans l'étude sont destinés à transporter un fluide en milieu marin en reliant deux systèmes amont et aval. Dans cette description générale, on ne distingue ni le type de ligne (flowline ou riser) ni le type d'effluent. Il s'agit de proposer une approche globale de ces systèmes. Lors de la caractérisation des fonctions, on verra apparaître les lignes particulières.

Les systèmes doivent répondre à trois fonctions principales (transporter un fluide à travers le milieu marin, être installé en mer et relier les systèmes amont et aval). Ces fonctions sont elles-mêmes assurées lorsque les fonctions secondaires le sont : pour transporter un fluide dans de l'eau de mer, le produit doit assurer l'écoulement, résister aux actions de l'eau de mer et du fluide

transporté. L'arbre fonctionnel de la Figure 4-4 présente le résultat de la décomposition logique des fonctions.

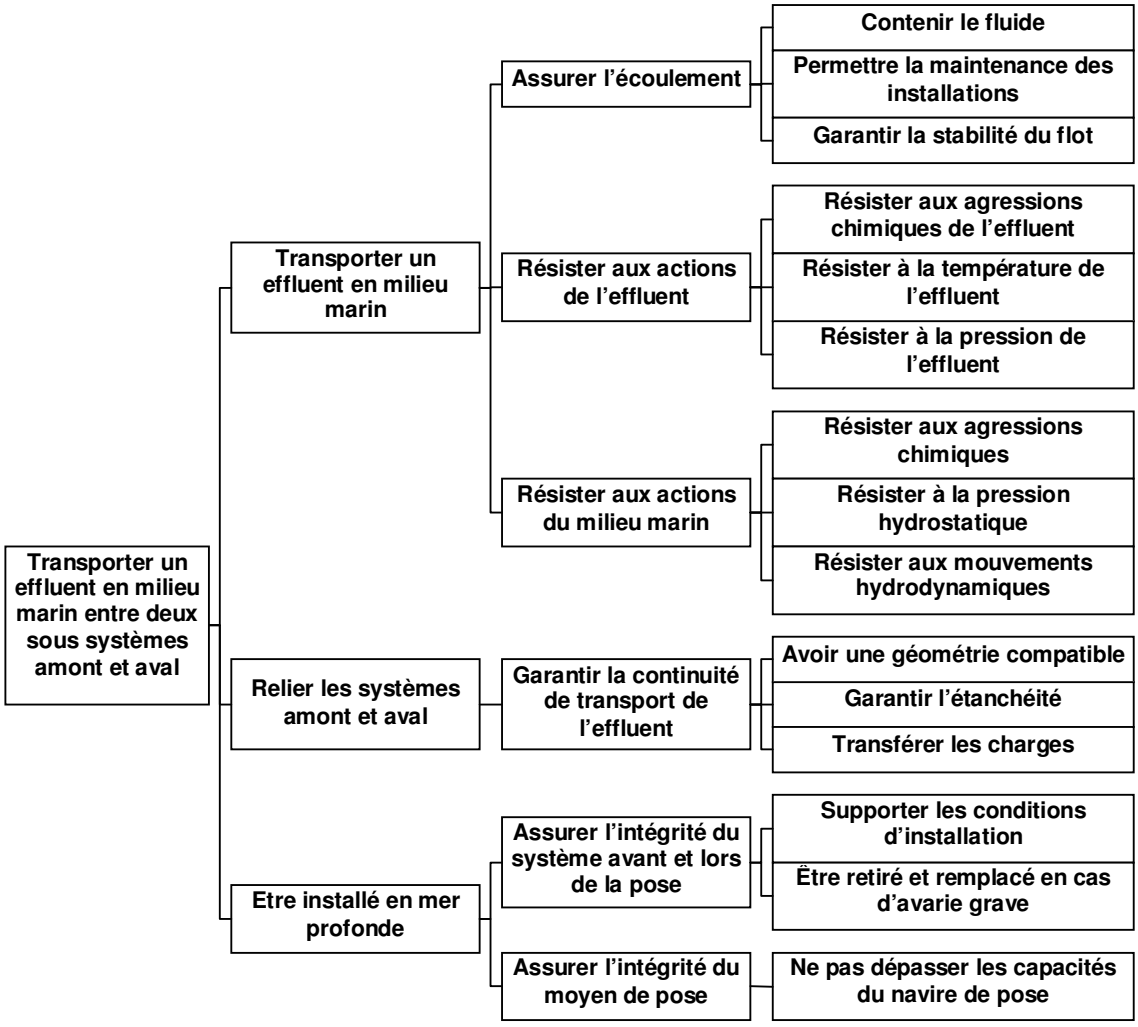


Figure 4-4 : Décomposition logique des fonctions d'une canalisation offshore

4.2.5.4 Description des fonctions

Transporter un effluent en milieu marin

Assurer l'écoulement

Contenir le fluide : Pour rester étanche, le fluide contenu ne doit pas endommager la structure de la ligne. Le choix de matériau se fera par compatibilité avec le type d'effluent convoyé. La composition chimique des effluents va permettre de choisir le matériau le plus adapté. On distingue 5 classes de fluides internes : de l'huile de production (composé d'eau et d'hydrocarbure en phase liquide et gazeuse), de l'eau et du gaz destinés à l'injection, de l'huile d'exportation (huile traitée) et enfin du gaz d'exportation.

Permettre la maintenance des installations : La durée de vie d'un champ, et donc du réseau de transport doit être de 20 ans. Au cours de cette période, l'huile produite peut déposer des paraffines ou créer des bouchons d'hydrate. Une mesure couramment utilisée consiste à curer l'intérieur des canalisations à l'aide de racleurs. La périodicité et la technique utilisée dépendent du type de ligne et du type de fluide produit (teneur en paraffines, hydrates, fréquence des arrêts de production). On opère ces manœuvres selon un programme déterminé en fonction des déchets recueillis. Il faut donc prévoir le passage de ces racleurs et vérifier la compatibilité du système avec le matériau constituant la paroi interne de la conduite.

Garantir la stabilité du flot : Les conditions de pression, température d'entrée et de sortie ainsi que le débit volume (barils/jour) sont spécifiés par l'opérateur. Selon les besoins opératoires, il fixe le diamètre externe de la conduite (OD - Outer Diameter).

Cas particulier des lignes de production : En régime d'écoulement permanent, la température doit être supérieure à la température de formation de paraffine et on définit le coefficient d'échange thermique global qui est une propriété caractéristique de la canalisation. En phase d'arrêt de production (régime transitoire), les conditions de pression et de température à l'intérieur de la conduite vont évoluer et atteindre la zone de formation d'hydrate. Il faut laisser le temps à l'opérateur de mettre le réseau en sécurité (en remplaçant l'huile brute par de l'huile morte). Ce temps de refroidissement (cool down time) dépend de la qualité de l'huile, des conditions de pression et de température en tête de puits et de l'étendue du réseau.

Résister aux actions de l'effluent

Résister aux agressions chimiques de l'effluent : il est impératif que les matériaux constituant la structure du tube ne se dégradent pas au contact des effluents. Le choix de matériau s'effectuera sur la base de la compatibilité chimique avec les fluides transportés.

Résister à la température de l'effluent : La température des effluents peut parfois être élevée notamment pour les fluides de production ou pour les lignes d'injection d'eau.

Résister à la pression de l'effluent : La pression interne va engendrer un état de contrainte biaxiale dans la conduite.

Résister aux actions du milieu marin

Résister aux agressions chimiques : La structure du tube ne doit pas se dégrader en contact avec l'eau de mer. Le choix d'une solution pérenne s'effectuera sur la base d'un matériau aux propriétés stables en environnement marin. Une série d'analyses permet de déterminer la température et la composition chimique de l'eau de mer à différentes profondeurs.

Résister à la pression hydrostatique : Un corps plongé dans l'eau de mer de densité ρ_{eau}

subit une pression P à la profondeur z : la pression hydrostatique est donnée par $P = \rho_{eau}.g.z$ où g est l'accélération de la pesanteur.

Résister aux mouvements hydrodynamiques : Les lignes doivent supporter les déplacements de l'eau de mer sans subir de dommages catastrophiques. Ces déplacements sont générés par les efforts en surface (houle, courant, marée, mouvements du support flottant), les efforts dans la tranche d'eau (courant, marée), les efforts au fond (courants profonds, glissement du sol, instabilités des fonds marins).

Le comportement des lignes vis-à-vis des mouvements de l'eau dépend également de l'architecture de la ligne. Les lignes qui relient le fond à la surface sont sensibles aux courants et aux déplacements du support flottant. Les lignes posées au fond doivent être suffisamment pesantes afin de ne pas se déplacer sous l'action des courants marins.

Relier les systèmes amont et aval

Garantir la continuité de transport d'effluent

Avoir une géométrie compatible : la conduite devra être connectée aux éléments présents sur le réseau comme les têtes de puits, les collecteurs ou les supports flottants. Pour les risers, le choix des systèmes de connexion au fond et à la surface va dépendre des sollicitations hydrodynamiques du milieu et des facilités d'installation. Pour absorber les sollicitations dynamiques imposées par les mouvements de houle, on utilise, sur des canalisations rigides, des connecteurs souples. Les choix des connecteurs et de la configuration du riser sont donc très liés. Pour les flowlines, la méthode classique consiste à équiper l'extrémité de la conduite d'un dispositif de terminaison qui sera compatible avec le réseau et qui facilitera l'installation. Ce dispositif est mis en place en surface et la conduite ainsi terminée est descendue au fond.

Garantir l'étanchéité : comme la structure de la ligne, les interfaces doivent rester étanches.

Transférer les charges : les interfaces du système avec les ensembles amont et aval doivent supporter les conditions environnementales, parfois sévères, liées aux mouvements hydrodynamiques imposés par la mer. Les embouts des lignes doivent être capables de transférer ces sollicitations hydrodynamiques.

Etre installé en mer profonde

Assurer l'intégrité du système avant et lors de la pose

Supporter les conditions d'installation : l'intégrité de la canalisation doit être respectée au cours de cette phase. S'il y a des risques d'endommagement, des mesures de protection doivent être envisagées. Les risques sont spécifiques à chaque méthode de pose.

Etre retiré et remplacé en cas d'avarie grave : ce sont des opérations rares et délicates. Un tronçon de canalisation doit pouvoir être remplacé si son intégrité n'est plus assurée.

Assurer l'intégrité du moyen de pose

Ne pas dépasser les capacités des navires de pose : les navires de pose sont des outils qui possèdent leurs propres limites. Il faut donc considérer les capacités des navires lors de la conception de la canalisation. Le choix de la méthode de pose dépend de la localisation géographique du champ, de la profondeur d'eau, de la longueur de canalisation à poser.

Cette analyse a permis de réaliser un bilan, en principe exhaustif, des fonctions que le système doit réaliser pour assurer le besoin. Le caractère résolument général de cette analyse rend son utilisation difficile en l'état. En effet, il faut compléter cette analyse par des données précises, en particulier relatives à la méthode de pose. C'est l'étape de caractérisation des fonctions. Cet exercice est réalisé dans le prochain paragraphe en prenant comme point de départ un exemple précis lié à un besoin spécifique de SAIPEM. Ainsi, nous disposerons d'un cas industriel typique sur lequel on pourra expérimenter la démarche de conception de multimatériaux proposée au chapitre 3.

4.3 PRESENTATION DU PROBLEME DE CONCEPTION

4.3.1 Contexte industriel

SAIPEM est un groupe parapétrolier spécialisé dans la réalisation de projets complexes de grande envergure. Ce groupe s'est forgé une solide réputation dans les régions réputées difficiles, en particulier la zone offshore de l'Afrique de l'Ouest. Sa force vient en particulier de son avance en termes de moyens de pose : sa flotte de navires est particulièrement adaptée aux conditions de l'offshore profond.

Avec l'augmentation de la profondeur de pose, SAIPEM rencontre des difficultés pour assurer l'installation de certaines lignes de production au-delà de 1800 mètres ([2]). Ces lignes, caractérisées par de très bonnes performances thermiques et mécaniques, sont construites sur la base du concept de « Pipe-In-Pipe » (PIP). Cette conception particulière repose sur un arrangement de deux tubes coaxiaux en acier au carbone et d'un isolant thermique placé dans l'espace annulaire. Pour aller plus profond, le choix de l'acier peut être remis en cause. Les exemples de développements présentés au paragraphe 4.2.4 attestent que des solutions alternatives sont envisageables.

Le besoin fondamental peut alors être formalisé comme suit : il s'agit de trouver des solutions alternatives au PIP qui permettent à SAIPEM de poser des canalisations en eaux très profondes tout en utilisant ses moyens de pose existants.

Nous proposons dans ce paragraphe d'établir le cahier des charges fonctionnel d'une flowline de production. Après avoir rassemblé les données sur les fonctions à assurer, nous définirons le ou les objectifs du problème de conception, les astreintes et variables libres.

4.3.2 Cahier des charges fonctionnel d'une flowline de production

A partir de l'analyse fonctionnelle réalisée dans ce chapitre, il est possible de dégager un cahier des charges fonctionnel. Celui-ci peut être scindé en deux parties relatives aux deux phases critiques du cycle de vie de la canalisation. On distingue ainsi la phase d'installation et la phase de service.

Lors de l'installation, on fait l'hypothèse que la méthode de pose en J sera utilisée pour poser la canalisation. Le principe est le suivant. Des tronçons de longueur donnée sont préparés

[2] Cette valeur est fournie à titre indicatif.

sur le pont du navire. La tour de pose bascule à l'horizontale pour charger un tronçon de canalisation puis revient à la verticale pour la réalisation de l'assemblage (par soudure dans le cas de l'acier) avec la partie de ligne déjà immergée. L'ensemble est ensuite immergé tandis que le navire avance.

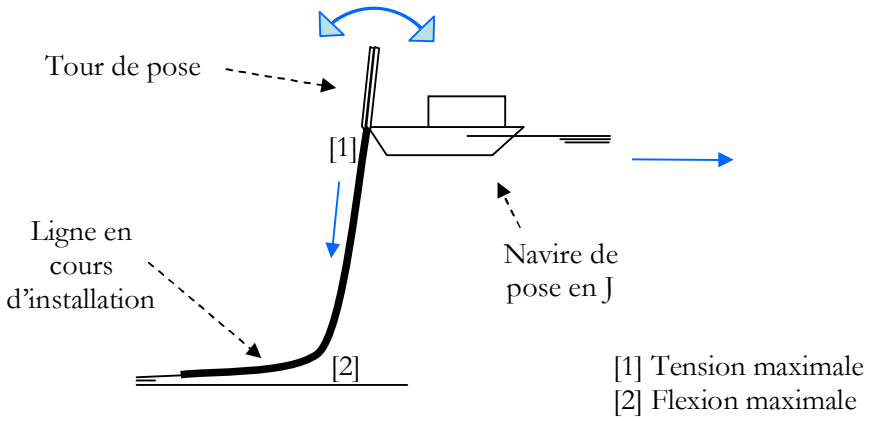


Figure 4-5 : Schéma de principe de la méthode de pose en J

Au cours de l'installation, la ligne est posée à vide. Néanmoins, on calcule la charge de tête en considérant le cas accidentel d'envahissement de la conduite par l'eau de mer. Avec ce système de pose, on constate que la structure est soumise à des contraintes particulièrement sévères à la sortie du navire de pose (point [1] de la Figure 4-5) et au contact avec le fond marin (point [2]) ; en [1], la tension axiale est maximale et en [2], la flexion est maximale.

En phase de service, la ligne repose sur le fond marin. Elle est connectée à chaque extrémité à des collecteurs ancrés sur le fond. L'ensemble de la ligne subit la pression des effluents de production. Le dimensionnement est réalisé en un point quelconque situé sur la canalisation [3] (Figure 4-6)

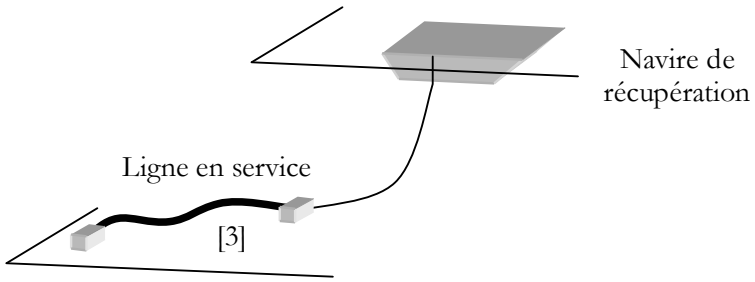


Figure 4-6 : Schéma de principe de la ligne en service

Le tableau suivant fournit l'ensemble des fonctions, critères et niveaux des critères auxquels la flowline de production doit répondre. Puisqu'on s'intéresse à la partie courante de la canalisation, les fonctions liées aux connexions ne sont pas considérées. De la même façon, à ce stade, on ne prend pas en compte les fonctions liées à la maintenance.

Tableau 4-3 : Cahier des charges fonctionnel d'une flowline de production

S/I[1]	Fonction	No.	Variable	Notation	Niveau du critère	Unité
S	Garantir la stabilité du flot	1	Coefficient d'échange thermique global	U_o	0,7	$W.m^2.K^{-1}$
		2	Diamètre interne	d_o	12	pouces
S	Résister aux agressions chimiques de l'effluent	3	Résistance aux acides	RA_o	4[2]	s.u. [3]
S	Résister à la température de l'effluent	4	Température maximale	$T_{\max o}$	+90	°C
		5	Température minimale	$T_{\min o}$	-10	°C
S	Résister à la pression de l'effluent	6	Résistance à la pression de service	p_{io}	350	bars
I-S	Résister aux agressions chimiques du milieu marin	7	Résistance à la corrosion	RE_o	4	s.u.
I-S	Résister à la pression hydrostatique	8	Profondeur	H_o	2000...3000	m
		9	Résistance à la pression hydrostatique[4]	p_e	---	bars
I-S	Résister aux courants marins	10	Non flottabilité [5]	---	---	---
I	Respecter les capacités du navire	11	Charge en tête maximale	$T_t^{\max}$	7500	kN
		12	Diamètre de serrage maximal	$d_e^{\max}$	22	pouces
I	Supporter les conditions d'installation	13	Résistance au poids propre[6]	T_{vrai}	---	N
		14	Résistance au frottement sur le fond marin	RU_o	4	s.u.
		15	Résistance à la flexion au point de touche[7]	R_c	---	m

[1] « I » pour Installation et « S » pour Service.
[2] la qualité est notée sur une échelle allant de très bon, noté 5, à très mauvais, noté 1.
[3] sans unité
[4] pression hydrostatique, fonction de la profondeur
[5] le critère de non flottabilité permet de mesurer la capacité de la conduite à rester immobile dans l'eau sous l'action de courant marin. Ce critère est explicité en annexe III.
[6] tension axiale, définie en annexe III
[7] rayon de courbure, défini en annexe III

La définition des critères telle qu'elle est proposée dans ce tableau correspond à une pratique largement répandue dans le domaine de l'ingénierie de structures sous-marines. Une partie des critères est donnée sous forme explicite comme les critères sur la tenue en température. Le reste nécessite une modélisation spécifique qui est largement abordée dans l'annexe III ; c'est par exemple le cas de la résistance à la pression hydrostatique.

On basera notre étude sur la capacité de la tour d'un des bateaux phares de la flotte de SAIPEM. Sur ce navire, la tour de pose impose une tension maximale admissible de 7500 kN et sous cette condition, les lignes de production à hautes caractéristiques thermiques et mécaniques traditionnelles[3] ne peuvent pas être posées au-delà de 2000 mètres. Par conséquent, cette limite constitue le point de départ de la recherche de solutions nouvelles.

Nous disposons à présent d'une description fonctionnelle précise et a priori exhaustive d'une flowline de production. De plus, un principe de solution adapté au transport sous-marin d'hydrocarbure a été retenu (voir paragraphe 3.2.2). Ce principe conduit à un choix géométrique : la structure à concevoir est un tube de faible diamètre (quelques dizaines de centimètres) et de grande longueur (plusieurs dizaines de kilomètres). Enfin, la revue de conception proposée au paragraphe 4.2.4 montre que l'architecture de la paroi du tube la plus probable est un multicouche axisymétrique.

Avec l'ensemble de ces éléments, nous disposons des informations nécessaires (mais non suffisantes) pour débuter la procédure de sélection des matériaux qui constitueront la paroi de la canalisation.

Les derniers éléments à préciser avant de sélectionner les matériaux sont le(s) objectif(s) de conception, la(les) variable(s) libre(s) et les astreintes de conception. Cette étape de la démarche, appelée « traduction du problème de conception » est traitée dans le prochain paragraphe.

4.3.3 Traduction du problème de conception : quels sont les objectif(s), les astreintes et les variables libres du problème ?

L'ensemble des ces notions de conception a été introduit par Ashby (cf. paragraphe 3.2.1). Il convient maintenant de les préciser dans le cas particulier des flowlines.

Objectifs d'optimisation :

Les flowlines de production les plus performantes techniquement et économiquement sont basées sur le concept de Pipe-in-Pipe (PIP). Il existe plusieurs variantes qui diffèrent selon la conception des extrémités et la méthode d'installation, néanmoins, elles sont toutes construites en acier au carbone. L'utilisation de ce matériau n'étant plus acceptable dans les conditions de l'offshore ultra profond, il faut imaginer de nouvelles solutions optimisées qui permettent d'atteindre de fortes profondeurs d'eau. Or l'optimisation d'une solution industrielle est fortement liée à la notion de coût. Si l'on se place du point de vue d'une société parapétrolière

[3] Les lignes de production actuellement utilisées combinent une ou plusieurs couches d'acier et une couche d'un isolant thermique

comme SAIPEM, il est raisonnable de penser que, toutes choses égales par ailleurs, elle aura toujours plus de facilité à remporter un appel d'offre si sa solution est meilleur marché que celle de son compétiteur. Dans cette étude, on propose de considérer uniquement le coût matière dans l'évaluation du coût d'une solution. Il est évident que l'on tronque une partie de l'information car le coût d'une solution devrait de plus intégrer le coût de fabrication, du transport et celui de l'installation. Mais le coût matière est une information relativement accessible et facilement manipulable à une étape préliminaire de la conception. Lors de l'analyse des résultats, nous garderons à l'esprit qu'une grande partie de l'information sur le coût des solutions est manquante. C'est pourquoi il conviendra de garder un nombre suffisant de solutions à l'étape du classement et de rester prudent sur les conclusions.

Dans ce contexte, la profondeur d'eau et le coût sont des paramètres d'optimisation de notre problème. On peut donc poser trois types de problème d'optimisation :

- Optimisation simultanée du coût et de la profondeur,
- Optimisation de la profondeur d'eau, le coût est déduit dans un deuxième temps,
- Optimisation du coût, la profondeur devient une astreinte.

Le choix d'un type de problème n'est pas sans conséquence car il conduirait a priori à des solutions différentes.

On a pu constater au cours de l'étude bibliographique que la gestion simultanée de deux objectifs de conception conduit à une indétermination à l'étape de classement. Celle-ci peut être levée si un des deux objectifs est le coût comme c'est le cas dans le problème présent. Alors on peut proposer des coefficients d'échange permettant de départager les solutions entre elles. Le problème de classement des solutions revient à évaluer la valeur que l'on donne à l'augmentation de la profondeur d'eau. Ces éléments étant complexes à estimer de manière fiable et réaliste, le premier type de problème de conception est écarté.

Le second type de problème de conception est également difficile à mettre en œuvre car la profondeur d'eau peut être considéré comme une astreinte de conception et/ou un objectif d'optimisation. La traduction des astreintes semble d'emblée particulièrement délicate.

Le troisième type de problème semble plus abordable dans notre position. En effet, même si le coût d'une solution est très délicat à estimer, c'est un paramètre de conception incontournable d'un développement industriel. Pour déterminer l'influence du paramètre « profondeur », on comparera les solutions optimisées en réitérant la procédure de recherche de solutions pour une profondeur d'eau allant de 2000 à 3000 mètres.

Variables libres :

Les variables libres sont les données géométriques inconnues nécessaires à la sélection des

matériaux et au dimensionnement de la structure. On réalise un bilan des données géométriques connues en se basant sur l'analyse fonctionnelle et le cahier des charges qui en découle. Ce bilan montre que le problème autorise un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sur lesquelles on s'appuie pour extraire les variables libres du problème.

La structure à concevoir est un tube de faible diamètre D_o devant la longueur L_o. Ces données sont fixées par l'opérateur (le client) au départ du projet.

La première hypothèse est que l'on considère que les caractéristiques géométriques et matériaux ne varient pas si on se déplace sur la génératrice du tube de telle sorte que les propriétés du tube soient constantes dans la direction longitudinale. Cette première simplification autorise un passage 3D/2D illustré en Figure 4-7. Cette hypothèse permettra de réaliser un premier travail de sélection de matériaux pour la partie courante. Toutefois, il est évident qu'il s'agit d'une approximation grossière de la réalité. En effet, nous ne prenons pas en compte la conception des extrémités des tronçons de canalisation. Donc, on suppose que ce point, loin d'être un détail, devra être abordé au cours d'une phase de conception ultérieure.

La seconde hypothèse considère que les propriétés du tube sont uniformes sur le contour. Cette hypothèse se justifie par le fait que la géométrie de la structure et les sollicitations (d'origine mécanique et thermique) présentent une symétrie de révolution. Ainsi l'étude d'une coupe transversale du tube peut se réduire à l'étude d'un secteur de la paroi (Figure 30c). On vérifiera que cette hypothèse est réaliste à l'étape de modélisation.

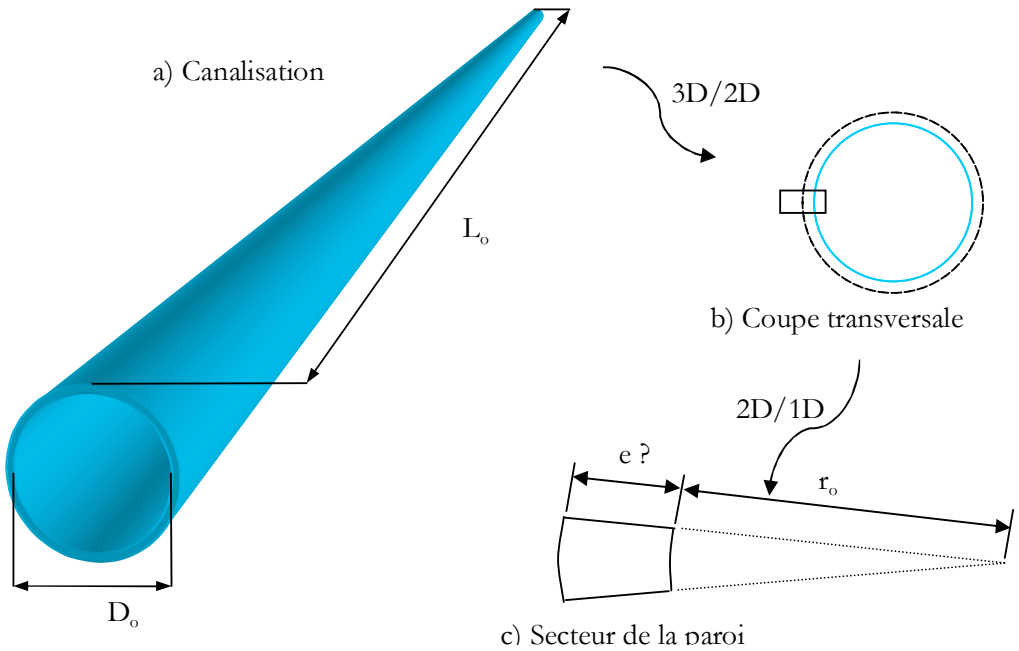


Figure 4-7 : Simplification du problème de conception : passage 3D/1D

L'épaisseur du tube sera considérée comme uniforme. Le problème de conception possède une seule variable libre (l'épaisseur) dans le cas où la paroi n'est constituée que d'un seul matériau. Dans le cas multimatériau, nous avons déjà vu que l'architecture multicouche est la solution la plus probable. En prenant les mêmes hypothèses, ces couches seront disposées de façon concentrique et leurs épaisseurs respectives seront uniformes. Dans le cas d'une conception multimatériau, il y aura donc autant de variables libres que de couches de matériau.

Astreintes de conception :

Les astreintes de conception sont issues directement du cahier des charges fonctionnel. Ce sont toutes les requêtes fonctionnelles qui doivent être satisfaites pour répondre au besoin. Elles renseignent sur le niveau d'acceptabilité d'une solution. Le Tableau 4-3 fournit les informations sur les 15 astreintes de conception liées au problème.

En résumé, nous avions comme point de départ un besoin exprimé de la façon suivante : « *il s'agit de trouver des solutions alternatives au PIP qui permette à SAIPEM de poser des canalisations en eaux très profondes tout en utilisant ses moyens de pose existants*.»

Après avoir précisé le cahier des charges fonctionnel, décrit le problème sous la terminologie de la méthode d'Ashby et proposé de modéliser l'objet « canalisation », le problème de conception soumis à l'étude devient : « o*n cherche à concevoir la partie courante d'une canalisation qui respecte les exigences d'une flowline de production au plus bas coût. Le paramètre libre du problème est l'épaisseur de la paroi. On considèrera que l'épaisseur est constante pour un matériau donné. Par exigences, on entend le respect des conditions d'installation et opératoires classiques. Le mode d'installation choisi est la pose en J (du à la forme de la ligne lorsqu'elle quitte le navire de pose et atteint le fond de l'océan). Des modifications mineures des moyens de pose pourront être éventuellement envisagées lors de l'étude* ». La résolution du problème de conception doit permettre d'aboutir à un ensemble de solutions matériaux pour la partie courante de la canalisation. Au cours de cette résolution on ne prend en compte ni la conception des extrémités des tronçons de canalisation, ni le procédé de mise en œuvre. Ces points devront faire l'objet d'une étude ultérieure.

4.4 RESOLUTION DU PROBLEME DE CONCEPTION

4.4.1 Introduction

Nous disposons d'un problème de conception industriel et nous cherchons à le résoudre en appliquant la méthode de conception exposée au chapitre 3. Dans cette partie, on se place, d'entrée, dans une perspective d'illustration de la méthode. Nous insisterons sur les solutions retenues bien que cela ne soit pas l'objectif ultime de cette thèse. Toutefois, il est nécessaire de critiquer les solutions sélectionnées par la méthode afin d'évaluer son potentiel et ses limites. Ainsi, l'objectif de cette partie, sans doute un des plus importants de ce travail de thèse, est la validation de la méthode de conception proposée par l'application sur un cas industriel : un pipeline de production disposé sur le fond marin à très grande profondeur et destiné à conduire le pétrole brut depuis la tête de puits jusqu'à un collecteur sous-marin.

Les étapes précédentes ont permis d'élaborer le cahier des charges fonctionnel du produit à concevoir. Nous avons ensuite effectué une « traduction » du cahier des charges fonctionnel. Cette traduction a permis de préciser l'objectif d'optimisation, la variable libre et les astreintes de conception. Nous sommes maintenant en mesure de passer à l'étape de résolution du problème. La résolution inclut la sélection du ou des matériaux constituant la structure ainsi que le dimensionnement.

Cette procédure permettra de faire ressortir, s'il existe, un ensemble de solutions acceptables. A ce niveau, nous pourrons valider la méthode car les solutions existantes doivent être présentes.

Conformément à la méthode proposée au chapitre 3, il convient de respecter une procédure. Nous avancerons donc par étapes successives pour résoudre le problème de conception. La première étape vise à trouver des solutions monolithiques au problème de conception. Si des matériaux conviennent alors on pourra effectuer directement le dimensionnement. Dans ce cas, le problème pourra être résolu en utilisant les méthodes existantes. Dans le cas contraire, nous passerons à la seconde étape qui vise à faire émerger des solutions multimatériaux en appliquant la méthode proposée. Ce paragraphe est organisé suivant cette logique : la recherche de solutions monolithiques, un bilan démontrant la non existence de solution monolithique, puis la recherche de solutions multimatériaux.

4.4.2 Conception monolithique

4.4.2.1 Introduction

L'examen des solutions de canalisations utilisées dans l'industrie offshore montre que certaines présentent un seul matériau dans l'épaisseur de la paroi. Il existe donc potentiellement des solutions de type monolithique. On trouve par exemple les lignes d'export d'huile morte ou encore les lignes d'injection d'eau, de gaz sec ou de méthanol. En analysant ces canalisations du point de vue fonctionnel, on remarque qu'elles ne répondent pas exactement au même type de besoin que les lignes de production (notre problème). En effet, ces dernières convoient un fluide multiphasique, sensible aux variations de température et de pression. La maîtrise du transport multiphasique passe par des solutions techniques actives ou passives, avec une préférence pour ces dernières. L'utilisation de matériaux isolants est donc une solution beaucoup plus répandue que le chauffage actif ou l'injection d'inhibiteurs chimiques. Or dans notre problème de conception, il faut trouver une solution pour transporter des hydrocarbures bruts ce qui implique la combinaison de fonctions thermique et mécanique. La nature de ces fonctions étant difficilement conciliable au sein d'un même matériau, il semble peu vraisemblable de voir émerger des solutions monolithiques à notre problème. Toutefois, dans un souci de cohérence, nous traitons le cas de la recherche de solutions monolithiques dans cette section.

4.4.2.2 Objectif, astreintes et variable libre du problème : rappel

L'objet du problème (défini au paragraphe 4.3.3.) consiste à concevoir une ligne de production devant être installée en grande profondeur. L'objectif est de minimiser le coût matière de la solution. Dans cette section, on cherchera des solutions monolithiques au problème. La profondeur est fixée à 2000 mètres (mais cette profondeur pourra être portée à 2500m et 3000m). Le diamètre interne d_o est connu. La Figure 4-7 donne une représentation schématique du produit : c'est un tube de grande longueur devant son diamètre. Il s'agit d'examiner quels sont les matériaux adéquats et d'effectuer le dimensionnement de la paroi. L'épaisseur du tube, variable libre du problème, est supposée uniforme. Il y a quinze astreintes de conception définie dans le cahier des charges fonctionnel (voir Tableau 4-3).

On rappelle brièvement le type d'astreintes du problème. Elles sont du type :

- mécaniques (résistances à la pression, à la tension, à la flexion),
- thermiques (échange par conduction à travers la paroi, tenue à la température),
- physico-chimiques (poids dans l'eau, tenues à la corrosion, à l'usure, aux acides),
- dimensionnelle (capacité du système de serrage).

4.4.2.3 Base de données matériaux

Pour illustrer la démarche de conception, il était nécessaire de disposer d'une base de données représentative des matériaux existants. Nous avons utilisé les informations issues du logiciel CES (Cambridge Engineering Selector [CES06]).

Cette base de données regroupe 62 matériaux suivant la classification usuelle : les céramiques et les verres, les métaux ferreux et non ferreux, les matériaux naturels et composites, les polymères et élastomères. La Figure 4-8 illustre la proportion (en pourcentage) des classes de matériaux présents dans la base. Le nombre relativement restreint de matériaux permet une présentation simple de la méthode, qui serait tout aussi applicable sur une base de données plus abondante.

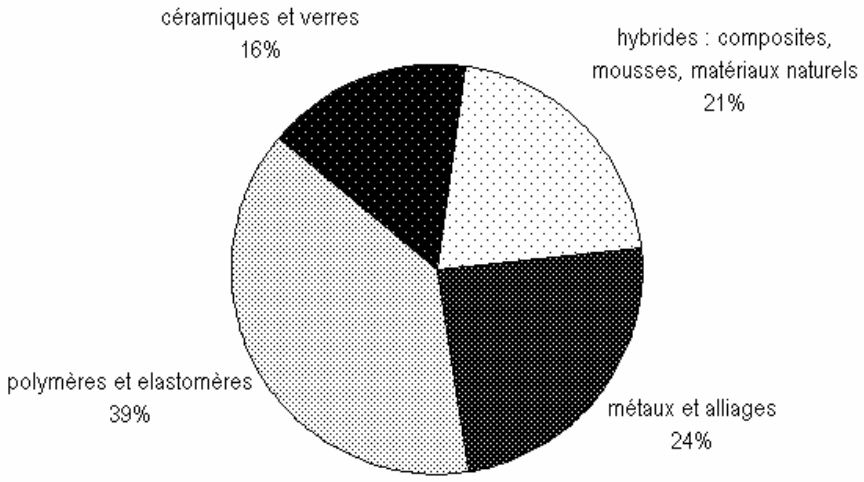


Figure 4-8 : Répartition des classes de matériaux de la base de données

Les informations contenues dans la base de données (que nous construisons à partir des informations de CES) sont organisées afin de faciliter le traitement informatique. Les matériaux sont regroupés par classe. Chaque classe de matériaux est repérée par un label qui lui est propre. Ainsi, la série « 100 » a été affectée aux matériaux de la classe des céramiques et des verres ; la série « 200 » à la classe des matériaux hybrides, mousses et matériaux naturels ; la série « 300 » aux métaux et leurs alliages ; et enfin la série « 400 » contient les matériaux de la classe des polymères et des élastomères. La classe des céramiques et verres contient dix matériaux, numérotés de 101 à 110 et ainsi de suite pour les autres classes. Enfin, à l'intérieur de chaque série, les matériaux sont classés par ordre alphabétique.

Le Tableau 4-4 illustre la présentation de ces informations : on présente trois des onze propriétés caractérisant chaque matériau : la résistance à l'eau de mer (RE), la masse volumique (Rho) et la température maximale en service (Temp. Max.). Ces deux dernières propriétés sont fournies explicitement (valeur et unité). Pour la résistance à l'eau de mer, c'est un peu différent car cette propriété traduit l'aptitude du matériau à résister à l'action corrosive de l'eau de mer. Cette aptitude est notée sur une échelle de un à cinq. Une très bonne capacité de résistance est notée cinq. On remarquera que l'expression du niveau des requis employé dans le cahier des charges fonctionnel (voir Tableau 4-3) est cohérente avec cette numérotation. L'intégralité de la base de données est fournie en annexe I et le Tableau 4-4 donne un extrait de ces informations.

Tableau 4-4 : Extrait de la base de données

LABEL	Name	RE	Rho ($g.cm^{-3}$)	Temp. Max. (K)
101	Aluminas	5	3	1350
(..)	(..)	(..)	(..)	(..)
110	Silica Glasses	5	2,17	1170
201	Epoxy Laminate (EP) - Carbon Prepreg	5	1,48	400
(..)	(..)	(..)	(..)	(..)
213	Wood (Medium Density), perpendicular to grain	3	0,45	290
301	Carbon steel, AISI 1015 (normalised)	3	7,8	617
(..)	(..)	(..)	(..)	(..)
315	Zinc-Copper-Titanium Pressure Die-Casting Alloy	4	7,05	353
401	Butyl Rubber, unfilled	5	0,9	370
(..)	(..)	(..)	(..)	(..)
424	Polyvinylchloride (UPVC) - Rigid	5	1,35	330

Il faut enfin remarquer que la pertinence des résultats issus de la conception est liée en partie à la qualité de la base de données. Il faut veiller à ce qu'elle soit suffisamment riche et attacher une attention toute particulière à l'exactitude des données.

4.4.2.4 Conditions de satisfaction des astreintes de conception

Les conditions de satisfactions des astreintes de conception sont établies dans le but de vérifier si un matériau donné est capable de répondre au cahier des charges. Ces conditions peuvent s'exprimer très simplement comme dans le cas de la résistance à la température de service. Le concepteur doit alors sélectionner un matériau qui ait une tenue en température au moins égale à la requête. Dans d'autres cas, il faut établir pour une astreinte donnée la relation entre les paramètres géométriques (connus et inconnus), les propriétés matériaux et les requêtes fonctionnelles. Le concepteur doit alors établir les modèles de comportements adéquats.

Ce paragraphe présente les conditions de satisfactions que tous matériaux doivent respecter pour répondre au cahier des charges fonctionnel d'une ligne de production. On présente brièvement les modèles de comportement utilisés dans l'étude. Ces modèles sont détaillés en annexe III. Afin de faciliter la compréhension, les principales grandeurs utilisées dans les modèles sont rappelées ci-dessous ; certaines de ces grandeurs correspondent à des règles spécifiques, et elles sont décrites plus précisément en annexe III.

Propriétés matériau

Y	Limite élastique	$T_{\max}$	Température de service maximale
ρ	Masse volumique	RE	Résistance à l'eau de mer
E	Module d'élasticité	RU	Résistance à l'usure
ν	Coefficient de Poisson	RA	Résistance aux acides
$T_{\min}$	Température de service minimale	λ	Coefficient de conductivité thermique

Requêtes

$T_{\min o}$	Température minimale (-10°C)	H_o	Profondeur (2000, 2500 et 3000 m)
$T_{\max o}$	Température maximale (+90°C)	d_o	Diamètre interne de la conduite (12 pouces)
RA_o	Résistance aux acides (4)	p_{io}	Pression interne maximale en service (350 bars)
RE_o	Résistance à l'eau de mer (4)	U_o	Coefficient d'échange thermique maximum (0,7 $W.m^{-2}.K^{-1}$)
RU_o	Résistance à l'usure (4)	$T_t^{\max}$	Tension maximale admissible dans la tour (7500 kN)
C_s	Coefficient de chainette (1,12)	$d_e^{\max}$	Diamètre maximum du système de serrage (22 pouces)

Géométrie

S_p	Section de la paroi de la conduite	S_e	Section extérieure du tube
S_i	Section interne de la conduite	D_m	Diamètre moyen

Constantes

g	Accélération de la pesanteur (9,81$m.s^{-2}$)
C_d	Coefficient d'amplification dynamique (1,15)
C_f	Coefficient de sécurité relatif à la rupture par flambage (0,67)
C_r	Coefficient de sécurité relatif à la résistance mécanique (0,7)
ρ_e	Masse volumique de l'eau de mer (1025 $Kg.m^{-3}$)

Le Tableau 4-5 liste les astreintes de conception et les critères associés. Si pour un matériau donné, l'ensemble de ces critères de conception est vérifié, c'est-à-dire qu'il passe l'étape de filtrage alors on pourra le retenir comme solution du problème.

Tableau 4-5 : Astreintes et condition de satisfaction des astreintes de conception

No.	Astreintes	Critère de satisfaction	Formules complémentaires
01	Résister à la température de l'effluent (min)	$T_{\min} \le T_{\min o}$	
02	Résister à la température de l'effluent (max)	$T_{\max} \ge T_{\max o}$	
03	Résister aux agressions chimiques de l'effluent	$RA \ge RA_O$	
04	Résister aux agressions chimiques du milieu marin	$RE \ge RE_0$	
05	Résister au frottement du fond	$RU \ge RU_O$	
06	Résister à la tension en tête (poids propre)	$\frac{C_r Y}{C_s C_d H_o (\rho - \rho_e) g} \ge 1$	
07	Résister à la pression et la flexion au point de touche (phase d'installation)	$\frac{C_r Y}{\sigma_{vm}} \ge 1$	$(\sigma_{vm})^2 = (\sigma_{eff} + \sigma_{flex})^2 + 3\left(\frac{B}{r^2}\right)^2$; $\sigma_{flex}(r) = \frac{E.r}{a}$; $\sigma_{eff} = \frac{T_o}{S_p} = \frac{a.w_{app}}{S_p}$; $B = \frac{(p_i - p_e) S_e S_i}{\pi S_p}$
08	Résister au flambage	$\frac{2Ee^3}{(1-\nu^2) D_m^3} \ge \frac{\rho_e g H_o}{C_f}$	
09	Résister aux pressions interne et externe (service)	$\sigma_{vm}(r_i) \le C_r Y$	$\sigma_{vm}(r) = \frac{\sqrt{3}\lvert B \rvert}{r^2}$
10	Garantir la stabilité du flot (limiter pertes thermiques)	$U \le U_o$	$U = \lambda \left[r_o \ln\left(\frac{r_o}{r_o + e}\right)\right]^{-1}$
11	Etre pesante dans l'eau (non flottabilité)	$\frac{\rho S_p}{\rho_e S_e} > 1.1$	
12	Ne pas dépasser la charge en tête admissible	$C_d C_s H_o w_{app} \le T_t^{\max}$	
13	Respecter l'encombrement du système de serrage	$e \le e_{adm}$	$e_{adm} = \frac{d_e^{\max} - d_o}{2}$

Bilan

L'ordre des astreintes utilisé dans le Tableau 4-5 obéit à une classification suivant le type d'astreintes de conception :

- Les six premières astreintes dépendent exclusivement des propriétés matériaux. Ce sont les astreintes sur les températures de service, la résistance à l'usure, aux acides, à l'eau de mer et à la tension en tête.

- Les six astreintes suivantes dépendent de la variable libre de conception, des propriétés matériaux et des paramètres géométriques connus. Ces astreintes portent sur la résistance mécanique en service et en installation, la stabilité, la résistance thermique et la tension maximale admissible.

- La dernière astreinte de conception ne dépend que des caractéristiques géométriques de la conduite. Il s'agit de l'astreinte relative au système de serrage qui impose une contrainte dimensionnelle sur le diamètre maximum admissible.

On peut enfin noter que les deux dernières astreintes présentées dans le Tableau 4-5 imposent à la conduite une épaisseur maximale pour un matériau donné alors que les cinq astreintes précédentes imposent une épaisseur minimale.

4.4.2.5 Filtrage

Principe

Le filtrage est la première étape de sélection des matériaux et s'effectue en utilisant les astreintes de conception, c'est pourquoi la traduction du besoin est une étape qui doit être réalisée avec soin. Le principe du filtrage consiste à éliminer les matériaux qui ne respectent pas les astreintes de conception. En conception monolithique, il suffit qu'une astreinte soit violée pour qu'un matériau soit rejeté.

Méthode de résolution

Le précédent bilan a montré que l'on pouvait classer les astreintes de conception. Il y a celles qui dépendent uniquement d'une propriété matériau, celles qui sont fonctions de la variable libre, de la géométrie et du matériau, et enfin celle qui ne dépend que de la variable libre. On va utiliser cette classification pour organiser les opérations de filtrage en deux étapes. Ces deux opérations sont réalisées successivement pour chaque matériau de la base de données. Elles sont illustrées sur la Figure 4-9.

Le plus simple est de commencer le filtrage avec les six astreintes portant directement sur une propriété matériau (tenue à la corrosion, température de fonctionnement en service, etc…).

Si un matériau passe ce premier filtre avec succès, on passe à la seconde étape qui a pour but de vérifier si les sept astreintes restantes peuvent être satisfaites simultanément. Ces astreintes dépendent des propriétés matériaux, des requêtes fonctionnelles, de la géométrie (connue) et de la variable libre du problème (l'épaisseur de paroi). On crée deux groupes de matériaux : le premier rassemble les astreintes qui imposent une valeur minimale à l'épaisseur (c'est par exemple le cas de l'astreinte de résistance mécanique), le second groupe d'astreinte impose une épaisseur maximale (comme l'astreinte d'encombrement).

Pour un matériau donné, on évalue l'épaisseur nécessaire pour satisfaire chaque astreinte de conception. En formant ces deux groupes d'astreintes, on peut extraire, pour chacun des groupes, l'astreinte dominante, définies comme la plus contraignante, ainsi que l'épaisseur correspondante. Un matériau est acceptable si l'épaisseur extraite du premier groupe est inférieure à l'épaisseur extraite du second. Ces opérations sont illustrées sur la Figure 4-9.

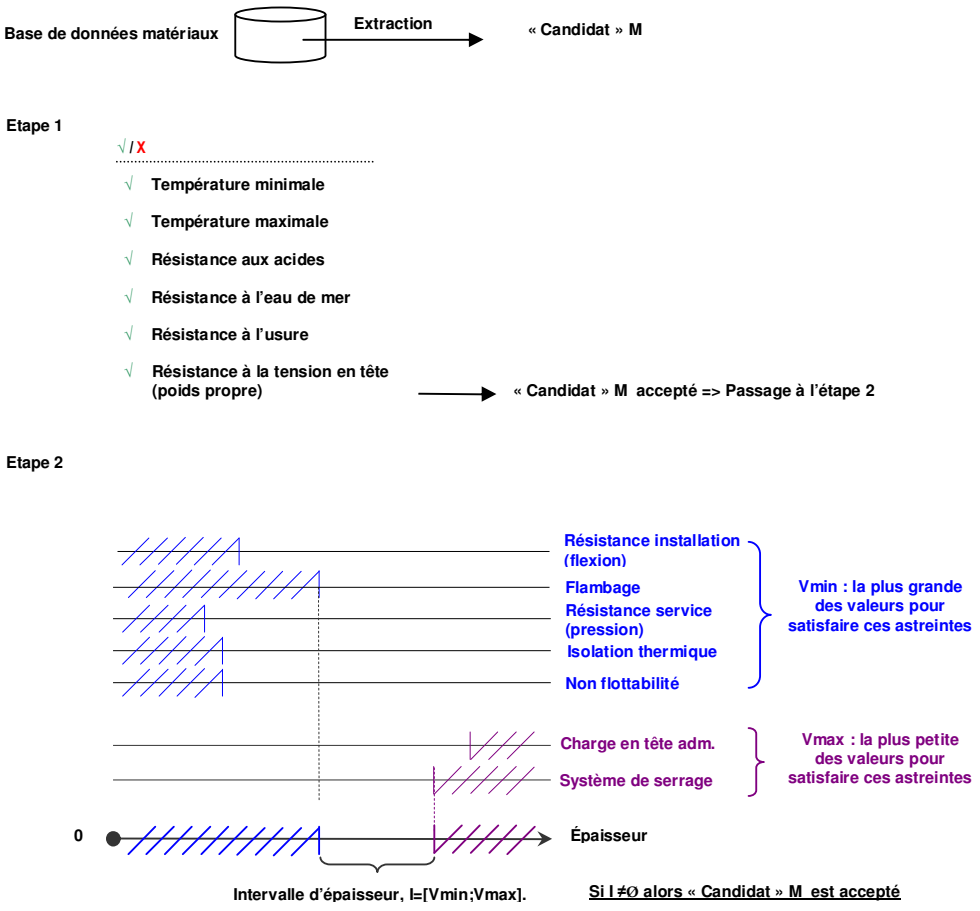


Figure 4-9 : Séquences des opérations de filtrage

Présentations des résultats

Les résultats de la première étape de filtrage (qui ne concernent que les astreintes sur les propriétés matériaux) sont présentés dans le Tableau 4-6. Les deux premières colonnes rappellent les classes de matériaux considérées et le nombre de matériaux dans chaque classe. Les cinq colonnes suivantes donnent le nombre de matériaux qui satisfont l'astreinte considérée. La colonne « Intersection » donne le nombre de matériaux de chaque classe qui satisfont simultanément toutes les astreintes de conception.

Tableau 4-6 : Filtrage sur les propriétés matériaux

		Nombre de matériaux acceptables vis-à-vis des astreintes sur les propriétés matériaux						Filtrage (Etape 1)
Classe	Nombre d'individus	Poids propre	$T_{\max o}$ (1)	$T_{\min o}$ (1)	RU_o (1)	RA_o (1)	RE_o (1)	Intersection
Verres et céramiques	**10**	**5** (50) (2)	**10** (100)	**10** (100)	**9** (90)	**7** (70)	**6** (60)	**4** (40)
Matériaux naturels, mousses et composites	**13**	**13** (100)	**10** (77)	**13** (100)	**5** (38)	**8** (62)	**8** (62)	**3** (23)
Métaux et alliages	**15**	**11** (73)	**13** (87)	**15** (100)	**15** (100)	**8** (53)	**4** (27)	**2** (13)
Polymères et élastomères	**24**	**22** (92)	**12** (50)	**24** (100)	**22** (92)	**13** (54)	**22** (92)	**4** (17)
Total	**62**							**13** (21)

(1) *Cf. notations Tableau 4-5*

(2) *« **5** (50) » signifie que 5 matériaux passent le filtre, soit 50% de la classe considérée.*

Au total, seuls 13 matériaux sur les 62 de la base de données sont acceptables après la première opération de filtrage. On remarque qu'il n'y a aucune astreinte de conception qui élimine d'emblée toute une classe de matériau. Par exemple, la classe des matériaux naturels, des mousses et des composites est réduite à 23% comme le montre le Tableau 4-6 . C'est la réunion des astreintes de conception qui conduit à réduire une classe de matériaux.

On passe à la deuxième étape de filtrage. Sur les treize astreintes de conception du problème, nous en avons déjà traité six qui portaient directement sur les propriétés matériaux. On considère ensuite les sept astreintes qui imposent des limites sur la variable libre : deux astreintes imposent une valeur maximale à l'épaisseur, les cinq autres imposent une épaisseur minimale (voir Figure 4-9). L'épaisseur nécessaire pour satisfaire chaque astreinte de conception dépendant de la variable libre a été déterminée soit analytiquement soit numériquement. Le Tableau 4-7 présente les résultats de ces évaluations. Dans ce tableau, on rappelle les treize matériaux qui ont passé la première étape de filtrage. Prenons l'exemple de l'alliage de titane qui porte le label 311. Il faut 2 millimètres pour assurer l'astreinte de résistance mécanique de la phase de vie en installation, 17 millimètres sont nécessaires pour éviter le flambage et 23 millimètres pour assurer

l'astreinte de stabilité. Pour respecter l'astreinte thermique, l'épaisseur est très grande. Sa valeur a été portée à 1000 pour des questions de traitement numérique. Ainsi, l'épaisseur minimale nécessaire est supérieure à l'épaisseur maximale admissible dominée par l'astreinte sur la charge en tête admissible (capacité navire) et qui impose une limite à 71 millimètres. L'alliage de titane ne passe donc pas la seconde étape de filtrage. La dernière colonne indique que ce matériau doit être rejeté.

Tableau 4-7 : Filtrage des matériaux

		FILTRAGE	**Etape 1 (rappel)**									**Etape 2**
Label		Matériau	**Filtre sur les propriétés**	Résistance à l'installation	Flambage	Résistance en service	Isolation thermique	Non flottabilité	*Epaisseur minimale*	Charge en tête	Encombrement	*Epaisseur maximale*	**Filtre sur la variable libre**
			√ / x [1]	mm	mm	mm	mm	mm	*mm*	mm	mm	*mm*	√ / x
	101	Aluminas	√	1000	13	39	1000	41	*1000*	113	127	*113*	x
	102	Aluminium Nitrides	√	1000	12	11	1000	42	*1000*	116	127	*116*	x
	107	Silicon Carbides	√	1000	11	17	1000	41	*1000*	113	127	*113*	x
	110	Silica Glasses	√	1000	20	77	1000	67	*1000*	171	127	*127*	x
	201	Carbon Fib./Ep Lam.	√	8	19	4	1000	160	*1000*	325	127	*127*	x
	202	Glass Fib./Ep Lam.	√	22	34	10	1000	118	*1000*	262	127	*127*	x
	203	Phenolic foam	√	1000	171	1000	49	1000	*1000*	127	127	*127*	x
	304	Stainless steel	√	21	14	7	1000	13	*1000*	40	127	*40*	x
	311	Titanium alloy	√	5	17	2	1000	23	*1000*	71	127	*71*	x
	405	Neoprene	√	1000	1000	1000	237	376	*1000*	538	127	*127*	x
	410	Polyester	√	1000	342	1000	469	1303	*1303*	759	127	*127*	x
	418	Polycarbonate	√	384	74	54	414	468	*468*	592	127	*127*	x
	412	Polypropylene	√	1000	99	1000	317	1000	*1000*	127	127	*127*	x

[1] √ signifie accepté et x signifie rejeté

La lecture de ce tableau permet de confirmer certaines tendances. Les verres, les céramiques et les métaux sont dominés par l'astreinte thermique et les polymères par les astreintes mécaniques. Ce résultat est cohérent avec la nature de ces matériaux : les polymères possèdent en général de meilleures propriétés d'isolation thermique que les métaux et les verres, c'est l'inverse quand on considère les propriétés mécaniques. Par contre, on remarque que l'acier au carbone – matériau quasi incontournable en construction de structure offshore – est éliminé dès la première étape de filtrage. Seul l'acier inoxydable est présent. Nous revenons sur une interprétation possible de ce choix au paragraphe suivant.

Exploitation des résultats

Le Tableau 4-7 montre que les treize matériaux ayant passé la première étape de filtrage ne sont plus acceptables après la seconde étape : la conclusion est simple, tous les matériaux ayant été éliminés, il n'y a pas de solution monolithique au problème de conception.

Pour les raisons évoquées en début de section, il semblait peu probable de trouver des solutions de ce type. L'analyse qui vient d'être présentée le confirme et c'est en partie la nature contradictoire des fonctions qui peut l'expliquer. Une autre explication à l'absence de solutions est qu'à l'issue de la première étape de filtrage, le nombre de matériaux restants est particulièrement faible ce qui laisse peu de chance de passer le second filtre. En effet, une grande majorité (79%) des matériaux de la base est éliminée dès le premier filtrage. Dans l'absolu, il suffirait qu'un seul matériau soit solution au problème pour le résoudre mais il faut rappeler que nous sommes à une étape préliminaire de conception et il y a encore de nombreux points à valider avant de pouvoir disposer d'une solution industrialisable. En particulier, l'analyse économique complète et la validation du procédé de fabrication industriel imposeront des contraintes supplémentaires : de nombreux matériaux pourront encore être rejetés. Ainsi, il faut veiller à conserver une quantité suffisante de solutions après chaque étape de conception. Par conséquent, on peut souligner que même si les fonctions thermiques et mécaniques paraissent contradictoires, il faut regarder plus attentivement pourquoi tant de matériaux (et notamment l'acier traditionnellement utilisé) sont rejetés lors du premier filtrage. Une analyse des principes de conception traditionnels peut apporter des éléments de réponses à cette question.

Traditionnellement, les canalisations sous-marines sont principalement en acier au carbone et pour maintenir dans un environnement agressif le niveau de fiabilité requis au cours de la vie d'un champ (plusieurs dizaines d'années), un effort particulier est produit afin de maitriser les techniques de soudage, le comportement en fatigue et la durabilité vis-à-vis de la corrosion sous contrainte. Les ingénieurs en charge de cette dernière discipline ont un large éventail de solutions à leur disposition. Ces solutions exploitées le plus souvent de manière couplée, utilisent des systèmes actif et passif de protection. Dans le domaine des solutions actives, certaines sont basées sur le principe de protection par courant imposé. En système passif, on utilise parfois des anodes sacrificielles. On rajoute aussi des surépaisseurs d'acier qui ne sont pas prises en compte dans le dimensionnement des éléments structuraux. Enfin, on peut protéger les structures métalliques en utilisant des peintures ou des liners en plastique.

Suivant cette analyse, on peut conclure que le principe de conception traditionnel s'appuie principalement sur une architecture multicouche : il y a une couche structurelle et une couche de protection constituée d'un liner plastique, d'une peinture ou d'une surépaisseur de métal. Les

résultats du premier filtrage sont cohérents avec cette analyse des pratiques industrielles. En effet, une majorité des métaux est éliminée sur le seul critère de résistance à l'eau (73%) tandis que la quasi-totalité des plastiques est acceptable pour cette astreinte (92%). Par conséquent, l'absence de solutions monolithiques et en particulier de l'acier au carbone s'explique, non seulement par une incompatibilité évidente entre les fonctions mécaniques et thermiques, mais aussi par la nécessité d'assurer la fonction de transport dans un environnement agressif. Cette conclusion justifie pleinement le choix d'orienter la conception vers des multimatériaux à architecture multicouche.

Cependant, la question de la protection par surépaisseur de métal demeure en suspens car on sait que notre méthode ne permettra pas toujours de proposer des solutions basées sur ce principe de conception. Il faut faire une distinction entre les techniques de mise en œuvre d'une surépaisseur de métal car elles impliquent des différences dans le mode de protection. La première technique, et la plus répandue, consiste à rajouter simplement une épaisseur d'acier. Le métal d'apport est donc identique au matériau structurel constituant la paroi. La seconde, plus élaborée et plus couteuse, consiste à réaliser un dépôt d'un métal de nature différente de celle de l'acier mais présentant des propriétés intrinsèques de résistance à la corrosion. Dans le premier cas, la couche protectrice est « consommée » au cours de la vie de la canalisation tandis que dans le second, le matériau de protection est choisi pour sa résistance à la corrosion. Cette différence est notable car dans notre méthode de conception, on ne considère pas le principe de dégradation de la couche pour réaliser la fonction de protection. Il est donc exclu de trouver des solutions de ce type sauf si on intègre ce principe dans les modèles de conception. On retiendra qu'un choix de conception spécifique basé sur un mécanisme particulier peut être intégré en cours de conception. Cela peut permettre de libérer certaines contraintes et ainsi ouvrir vers un choix de matériau encore plus large.

4.4.2.6 Bilan

Ayant constaté qu'aucun matériau de la base de données ne peut assurer simultanément toutes les astreintes de conception, l'étude s'oriente naturellement vers la recherche de solutions multimatériaux en commençant par la plus simple d'entre elles : la sélection de matériaux d'une conduite à deux couches. Il convient, dans notre logique d'illustration et de validation, de traiter le problème sans imaginer des solutions technologiques autres que celles découlant de la méthode. Nous verrons plus loin que l'on élimine beaucoup moins de matériaux en utilisant ce principe de conception.

4.4.3 Conception multimatériau : solutions à deux couches

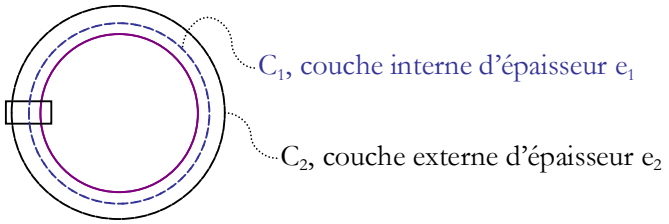
4.4.3.1 Traduction, modélisation et démarche de résolution du problème

On se place dans la situation où l'on cherche des solutions bimatériaux au problème de conception. La traduction du problème de conception doit intégrer certaines modifications afin de suivre le principe de conception d'une structure multicouche axisymétrique. Ces modifications portent sur le nombre de variables libres et l'affectation des astreintes aux couches. L'**objectif d'optimisation** reste le coût. On rappelle que le paramètre de profondeur est toujours fixé à 2000 mètres, frontière entre l'offshore profond et ultra profond.

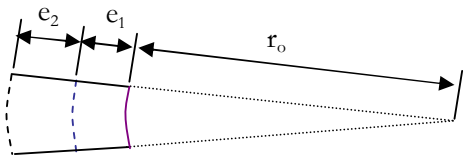
A la fin de cette section, on présentera brièvement les modèles utilisés pour simuler le comportement du multicouche. Une analyse plus détaillée des hypothèses de modélisations est proposée en annexe IV (Etude mécanique et thermique d'une canalisation sous-marine – paroi multimatériaux)

Variables libres

Le passage de un à deux matériaux dans l'épaisseur de paroi du tube introduit une variable libre de conception supplémentaire car pour dimensionner l'épaisseur totale de paroi, il faut connaître l'épaisseur de chaque couche. On numérotera par la suite les couches de l'intérieur vers l'extérieur, C_1 et C_2 comme indiqué sur la Figure 4-10.



a) Coupe transversale



b) Secteur de la paroi

Figure 4-10 : Représentation schématique du problème de conception

Astreintes de conception

Lors de la recherche de solutions monolithiques, on considérait que la couche assurait simultanément l'ensemble des astreintes de conception. Ce principe doit être adapté en conception multimatériau.

L'astreinte sur l'usure ne concerne que la paroi externe du tube et celle sur la résistance aux acides n'affecte que la paroi interne. Dès lors, on doit distinguer les astreintes de surface dont l'action est dirigée vers une seule couche, des autres astreintes de conception. A noter que la résistance à la corrosion à l'eau agit sur les parois interne et externe du tube. Les astreintes relatives à la température de fonctionnement sont également applicables aux deux couches, mais comme pour la corrosion, les deux couches doivent assurer l'astreinte indépendamment l'une de l'autre. Pour profiter de la combinaison de propriétés, on considère que les astreintes restantes sont assurées conjointement par les deux couches.

Le problème de conception comporte toujours treize astreintes de conception mais il faut prendre en compte leur mode d'action et de ce fait l'ordre des couches peut intervenir en conception multimatériau. Le Tableau 4-8 résume l'affectation des astreintes selon les couches pour cette conception du bimatériau.

Tableau 4-8 : Affectation des astreintes aux couches du tube bimatériau

N°	Astreintes de conception	Couche	
		C_1	C_2
01	Résister à la température de l'effluent (min)	√	√
02	Résister à la température de l'effluent (max)	√	√
03	Résister aux agressions chimiques de l'effluent	√	
04	Résister aux agressions chimiques du milieu marin	√	√
05	Résister au frottement du fond		√
06	Résister à la tension en tête (poids propre)	√	√
07	Résister à la pression et la flexion au point de touche	√	√
08	Résister au flambage	√	√
09	Résister aux pressions interne et externe (service)	√	√
10	Garantir la stabilité du flot (limiter pertes thermiques)	√	√
11	Etre pesante dans l'eau (non flottabilité)	√	√
12	Ne pas dépasser la charge en tête admissible (navire)	√	√
13	Respecter l'encombrement du système de serrage	√	√

√ indique si l'astreinte doit être prise en compte pour la conception de la couche

Conditions de satisfaction des astreintes de conception

Les relations décrites dans ce paragraphe sont issues de l'analyse de la conduite sous-marine multimatériau présentée en annexe IV. Des modèles ont été développés pour décrire le comportement de la canalisation dans ses différentes situations de vie. On rappelle ci-dessous les principaux paramètres géométriques et matériaux, de chaque couche et du multimatériau.

On définit pour une couche k de l'empilement :

Géométrie		Matériau	
r_k	rayon externe,	E_k	module d'élasticité,
r_{k-1}	rayon interne,	ρ_k	masse volumique,
$e_k = r_k - r_{k-1}$	épaisseur,	Y_k	limite élastique,
v_k	fraction volumique.	λ_k	coefficient de conductivité thermique.

Les caractéristiques du tube sont définies par :

Géométrie		Matériau homogénéisé	
r_o	rayon interne,	$\overline{E} = \sum_n E_k v_k$	module d'élasticité,
$\overline{e} = \sum_n e_k$	épaisseur totale,	$\overline{\rho} = \sum_n \rho_k v_k$	masse volumique.
$r_e = r_o + \overline{e}$	rayon externe,		

On notera que pour simplifier l'écriture des modèles, on a introduit les fractions volumiques des matériaux constituant les couches. Par convention, on appellera v_1 la fraction volumique de la couche C_1 et $\overline{e}$ l'épaisseur totale du multicouche. On prendra ces deux paramètres comme variables libres du problème.

Les conditions de satisfaction des astreintes de conception sont résumées dans le Tableau 4-9. Pour une combinaison de matériaux donnée, on doit vérifier l'ensemble des critères présentés pour pouvoir dire si cette combinaison est acceptable.

Tableau 4-9 : Conditions de satisfaction des astreintes de conception

No.	Astreintes	Critère de satisfaction
01	Résister à la température de l'effluent (min)	$T_{\min} \le T_{\min o}$
02	Résister à la température de l'effluent (max)	$T_{\max} \ge T_{\max o}$
03	Résister aux agressions chimiques de l'effluent (couche interne)	$RA \ge RA_O$
04	Résister aux agressions chimiques du milieu marin	$RE \ge RE_0$
05	Résister au frottement du fond (couche externe)	$RU \ge RU_O$
06	Résister à la tension en tête (poids propre)	$C_r Y_k / \sigma_{zz}^k \ge 1$
avec $\sigma_{zz}^k = C_c C_d H_o \left(\overline{\rho} - \rho_e\right) g \; E_k / \overline{E}$		
07	Résister à la pression et la flexion au point de touche (installation)	$\sigma_{vm}^k \le C_r Y_k$
avec $\sigma_{vm}^k = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\left(\sigma_{zz}^k + \sigma_{flex,\max}^k - \sigma_{\theta\theta}^k\right)^2 + \left(\sigma_{zz}^k + \sigma_{flex,\max}^k\right)^2 + \left(\sigma_{\theta\theta}^k\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$, $\sigma_{\theta\theta}^k = -\frac{E_k}{\overline{E}} \cdot \frac{\left(r_o + \overline{e}\right) p_e}{\overline{e}}$, $\sigma_{flex,\max}^k = \frac{E_k . r_k}{a}$, $\sigma_{zz}^k = \frac{E_k}{\overline{E}} \cdot \frac{\left(a \overline{\rho e}\left(2r_o + \overline{e}\right) - C_s H_o \rho_e \left(r_o + \overline{e}\right)^2\right) g}{\overline{e}\left(2r_o + \overline{e}\right)}$		
08	Résister au flambage	$p_{cr} \ge \rho_e g H_o / C_f$
avec $p_{cr} = \frac{3}{r^3}\left(\tilde{D} - \frac{\tilde{C}^2}{\tilde{E}}\right)$, $\tilde{E} = \sum_n \frac{E_k e_k}{0{,}91}$, $\tilde{C} = \sum_n \frac{E_k e_k \tilde{e}_k}{0{,}91}$, $\tilde{D} = \sum_n \left(\frac{E_k}{0{,}91}\right) \cdot \left(\frac{e_k^3}{12} + e_k \tilde{e}_k^2\right)$, $\tilde{e}_k = \sum_{j=1}^{k} e_j - \frac{e_k}{2}$		
09	Résister aux pressions interne et externe (service)	$\sigma_{vm}^k \le C_r Y_k$
avec $\sigma_{vm}^k = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\left(\sigma_{zz}^k - \sigma_{\theta\theta}^k\right)^2 + \left(\sigma_{zz}^k\right)^2 + \left(\sigma_{\theta\theta}^k\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$, $\sigma_{\theta\theta}^k = \frac{E_k}{\overline{E}} \cdot \frac{r_o p_i - \left(r_o + \overline{e}\right) p_e}{\overline{e}}$, $\sigma_{zz}^k = \frac{E_k}{\overline{E}} \cdot \frac{\left[r_o^2 p_i - \left(r_o + \overline{e}\right)^2 p_e\right]}{\overline{e}\left(2r_o + \overline{e}\right)}$		
10	Garantir la stabilité du flot (limiter pertes thermiques)	$U \le U_o$
avec $U = \left(r_o \sum_n \frac{1}{\lambda_k} \ln\left(\frac{r_k}{r_{k-1}}\right)\right)^{-1}$		
11	Etre stable dans l'eau (non flottabilité)	$\overline{\rho}\,\overline{S} / \rho_e S_e > 1.1$
12	Ne pas dépasser la charge en tête admissible (navire)	$C_d C_s H_o w_{app,pleine} \le T_t^{\max}$
avec $w_{app,eau} = \left(\overline{\rho} - \rho_e\right) \overline{S} g$		
13	Respecter l'encombrement du système de serrage	$\overline{e} \le e_{adm}$
avec $e_{adm} = \frac{d_{e\max} - d_o}{2}$		

Démarche de résolution du problème

Au chapitre 3, nous avions exposé une méthode de conception basée sur la connaissance préalable de l'architecture du multimatériau. Ensuite, nous avions présenté deux techniques pour résoudre ce problème : on distinguait assez naturellement la méthode de conception, qui propose un modèle de représentation du problème de conception, et la ou les méthodes ou techniques de résolution. Nous avions alors mis en évidence que la méthode de résolution devait évoluer en fonction du degré de complexité du problème. C'est en particulier le nombre de variables libres qui rend la résolution plus difficile.

D'après les résultats du chapitre précédent, les deux techniques de résolution sont applicables. Bien qu'elles aboutissent au même résultat, nous les présentons toutes les deux dans ce paragraphe car elles sont complémentaires par certains aspects.

La première technique de résolution suivra une méthode « pas-à-pas » et pourra être utilisée via un tableur standard (comme Excel par exemple). La seconde voie appliquera la programmation par contraintes et on résoudra le problème avec le solveur ECL^{i}PS^e. Cette seconde voie donnera des résultats plus rapidement car le traitement de l'information est transparent pour l'utilisateur, notamment aux étapes de filtrage. En revanche, on verra que l'on perd en partie la maîtrise du processus de sélection.

Conformément à la méthode proposée au chapitre 3 , la résolution du problème passe par quatre étapes successives :

- le filtrage préliminaire de la base de données,
- l'identification des constituants du multimatériau,
- le filtrage des combinaisons admissibles,
- l'optimisation des épaisseurs et le classement des solutions.

Pour chacune de ces étapes, on rappellera le principe de la méthode puis on présentera successivement la démarche de résolution, les résultats de l'analyse et une critique des solutions retenues.

4.4.3.2 Filtrage préliminaire de la base de données

Principe

Le filtrage préliminaire consiste à sélectionner les matériaux susceptibles d'être des constituants du multimatériau.

D'une part, on peut comparer les caractéristiques booléennes et interactives des matériaux avec les exigences du cahier des charges. On peut également utiliser quelques caractéristiques

intrinsèques telles que les températures minimales et maximales d'utilisation pour sélectionner des constituants potentiels.

D'autre part, on va chercher à déceler les incompatibilités entre toutes les astreintes du cahier des charges : cela permet de garder les matériaux potentiellement les plus aptes à satisfaire une partie identifiée du cahier des charges. L'association de matériaux répondant à des parties complémentaires du cahier des charges constituera un multimatériau potentiellement acceptable. En effet lorsqu'on traite un problème monolithique, un matériau est éliminé si toutes les astreintes ne sont pas assurées. Le filtrage s'envisage différemment pour un problème multimatériau. On s'appuie sur un principe de la conception multimatériau : si deux matériaux pris indépendamment ne satisfont pas l'ensemble des astreintes de conception, il est néanmoins raisonnable de penser que leur association pourrait permettre de satisfaire ces astreintes.

Dans notre problème, toutes les astreintes ne peuvent bénéficier de la combinaison des propriétés des deux couches comme on vient de le souligner. On a d'une part l'astreinte sur l'encombrement (diamètre de serrage fixé) qui impose un paramètre géométrique, et d'autre part, les astreintes portant sur la durabilité (par exemple les propriétés interactives).

Pour ces dernières, si un matériau n'est pas acceptable alors on ne pourra pas compter sur l'autre matériau de la combinaison pour assurer la requête. Il suffit qu'une seule de ces astreintes soit violée pour que le matériau soit rejeté. Par conséquent, ces astreintes de conception sont plus directement discriminantes que les astreintes qui dépendent de la combinaison de propriétés des deux matériaux. D'autre part, pour les propriétés interactives qui dépendent par définition de l'environnement, l'ordre des couches intervenant dans le multicouche devra être pris en compte.

Parmi les astreintes qui nécessitent un examen du bicouche dans sa globalité, l'astreinte portant sur le diamètre de serrage doit être traitée de façon particulière. En général, on retrouve assez souvent en conception une astreinte sur l'encombrement, et l'encombrement fixe souvent une limite géométrique qui vient contraindre la pièce à concevoir, ce qui peut être une source de conflit avec les autres astreintes. L'astreinte d'encombrement est relativement particulière car elle est absolue et ne fait pas intervenir les propriétés des matériaux. La particularité de cette astreinte sera reprise dans le paragraphe suivant.

Méthode de résolution

En suivant le principe énoncé ci-dessus, nous opérons trois filtrages intermédiaires qui conduisent à trois ensembles de matériaux (Tableau 4-10) :

- l'ensemble (A), issu du premier filtrage, regroupera les matériaux qui satisfont les quatre astreintes de durabilité relatives à la couche interne (astreintes 1 à 4 : résistance aux températures de service, à la corrosion de l'eau et aux acides forts),

- l'ensemble (B), issu du second filtrage, regroupera les matériaux qui satisfont les quatre astreintes de durabilité relatives à la couche externe (astreintes 1, 2, 4 et 5 : résistance aux températures de service, à la corrosion de l'eau et à l'abrasion),
- l'ensemble (C), issu du dernier filtrage intermédiaire, regroupera les matériaux qui pourront satisfaire les huit astreintes assurées conjointement par les deux couches (astreintes 7 à 13).

Tableau 4-10 : Affectation des astreintes de conception

N°	Dénomination des astreintes de conception	Ensembles		
		(A)	(B)	(C)
01	Résister à la température de l'effluent (min)	√	√	
02	Résister à la température de l'effluent (max)	√	√	
03	Résister aux agressions chimiques de l'effluent	√		
04	Résister aux agressions chimiques du milieu marin	√	√	
05	Résister au frottement du fond		√	
06*	Résister à la tension en tête (poids propre)			
07	Résister à la pression et la flexion au point de touche			√
08	Résister au flambage			√
09	Résister aux pressions interne et externe (service)			√
10	Garantir la stabilité du flot (limiter pertes thermiques)			√
11	Etre stable dans l'eau (non flottabilité)			√
12	Ne pas dépasser la charge en tête admissible (navire)			√
13	Respecter l'encombrement du système de serrage			√

√ indique que l'astreinte doit être prise en compte.
* Cette astreinte ne dépend pas de l'épaisseur de la couche. Elle ne participe pas au dimensionnement.

Pour qu'un matériau entre dans l'ensemble (A), (B), ou (C), il faut que toutes les astreintes listées dans les colonnes respectives du Tableau 4-10 soient respectées.

La construction des ensembles (A) et (B) permet d'établir une liste réduite aux seuls matériaux qui pourront respectivement être candidats sur les couches internes et externes.

Il faut ensuite constituer l'ensemble (C). On peut remarquer que la constitution de cet ensemble nécessite le passage par une étape de dimensionnement : il faut calculer l'épaisseur de matériaux nécessaire pour vérifier la satisfaction de chaque astreinte de conception. De façon générale, une condition nécessaire pour satisfaire une requête est que l'épaisseur est, soit inférieure, soit supérieure à une valeur qui dépend des données matériaux, géométriques et/ou fonctionnelles. A ce stade, il est possible de mettre en évidence les incompatibilités entre les astreintes de conception qui se manifesteront par des conflits entre les épaisseurs. On tracera donc pour chaque matériau un « diagramme des épaisseurs » (Figure 4-11).

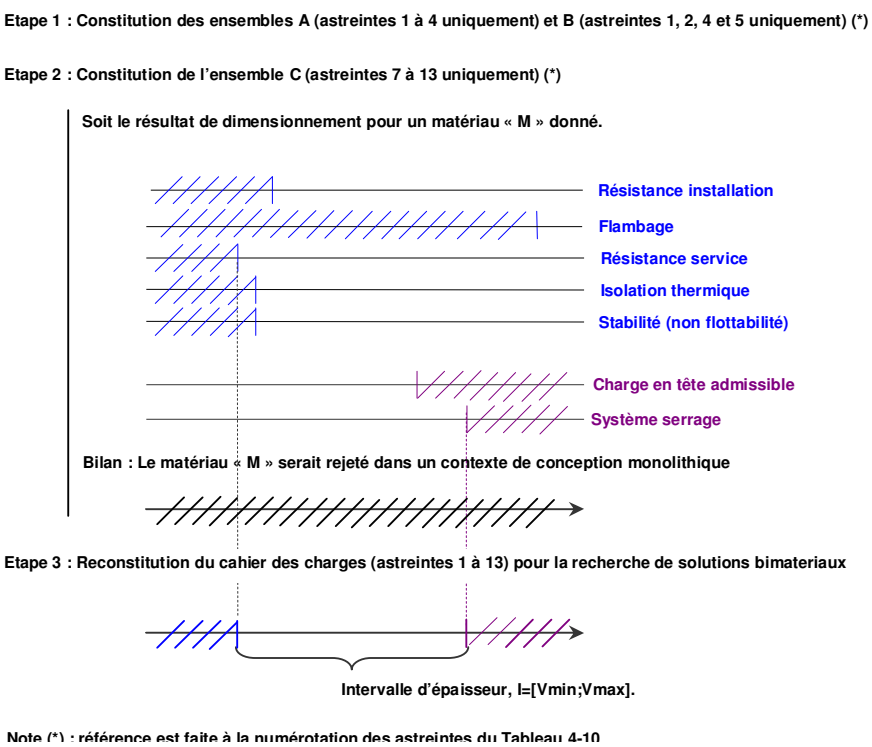


Figure 4-11 : Filtrage préliminaire de la base de données : diagramme des épaisseurs pour un matériau « M » donné

A l'évidence, on constate que le matériau M ne constitue pas une solution monomatériau puisque l'épaisseur issue de l'astreinte de flambage est en conflit avec les épaisseurs issues de la charge en tête admissible (capacité navire) et du système de serrage. Cette constatation peut s'exprimer plus finement en disant que seule l'astreinte de flambage n'est pas satisfaite, ce qui sous-entend que toutes les autres astreintes le sont : au sein d'un multimatériau, le matériau « M » serait donc acceptable à condition de l'associer à un autre matériau qui ne présente pas de conflit sur l'astreinte de flambage. Le matériau M sera donc retenu dans l'ensemble (C).

On considère le cas des astreintes donnant l'épaisseur maximale car il met en évidence le traitement particulier de l'astreinte d'encombrement. Dans l'exemple proposé, l'épaisseur nécessaire pour satisfaire l'astreinte sur la charge en tête admissible est inférieure à l'épaisseur imposée par le système de serrage (encombrement): l'épaisseur maximale pour ce matériau est donc imposée par le système de serrage. Si l'épaisseur liée à l'astreinte sur la charge en tête avait été supérieure à l'épaisseur imposée par le système de serrage, alors on aurait également pris l'astreinte d'encombrement comme valeur maximale : ceci correspond à la particularité de l'astreinte d'encombrement.

Enfin, pour « reconstituer » le cahier des charges de chaque couche, on assemble les listes

de matériaux. Les matériaux qui seront affectés à la couche interne appartiennent à l'intersection des ensembles (A) et (C), et ceux de la couche externe appartiennent à l'intersection des ensembles (B) et (C).

Résultats et commentaires

Pour les niveaux d'exigence définis dans le cahier des charges, on trouve 18 matériaux dans l'ensemble (A), 22 dans l'ensemble (B) et 62 dans l'ensemble (C) sur les 62 matériaux contenus dans la base de données. L'intersection de ces ensembles conduit, pour une profondeur de 2000 mètres aux listes de matériaux présentées dans le Tableau 4-11. La première colonne dresse la liste des 18 matériaux admissibles pour la couche interne. La seconde colonne donne les 22 matériaux pour la couche externe.

Tableau 4-11 : Liste de matériaux ayant passé les filtres préliminaires (Profondeur 2000m)

Couche interne (C_1) – Intersection de A et C		Couche externe (C_2) – Intersection de B et C	
Label	Matériau	Label	Matériau
101	Aluminas	101	Aluminas
102	Aluminium Nitrides	102	Aluminium Nitrides
107	Silicon Carbides	107	Silicon Carbides
108	Tungsten Carbides	108	Tungsten Carbides
110	Silica Glasses	110	Silica Glasses
201	Epoxy Laminate (EP) - Carbon Prepreg	201	Epoxy Laminate (EP) - Carbon Prepreg
202	Epoxy Laminate (EP) - Glass Prepreg	202	Epoxy Laminate (EP) - Glass Prepreg
203	Phenolic Foam: Closed Cell (0.080)	203	Phenolic Foam: Closed Cell (0.080)
204	Polycarbonate Foam: Rigid,Closed Cell (0.65)	304	Cast austenitic stainless steel(ASTMCG-8M)
205	Polymethacrylimide Foam:Rigid PMACR 0.071	311	Near-alpha titanium alloy (6-2-4-2) (a)
304	Cast austenitic stainless steel (ASTM CG-8M)	312	Nickel Beryllium Casting Alloy CR-1, as cast
311	Near-alpha titanium alloy (6-2-4-2) (a)	401	Butyl Rubber unfilled
405	Polychloroprene (CR) Neoprene	403	Isoprene (IR) unfilled
407	Silicone (SIL) elastomers	405	Polychloroprene (CR) Neoprene
410	Polyester (PES) - casting / flexible	407	Silicone (SIL) elastomers
417	Poly TetraFluoro Ethylene (PTFE)	408	Epoxies (EP), rigid
418	Polycarbonate (PC)	410	Polyester (PES)
421	Polypropylenes (PP)	417	Poly TetraFluoro Ethylene (PTFE)
		418	Polycarbonate (PC)
		419	Polyether ether ketone (PEEK)
		420	Polyethylene terephthalate (PET)
		421	Polypropylene (PP)

Toutes les classes de matériaux sont représentées dans chacune des listes. Pour la couche externe, on souligne la présence d'une mousse isolante. On peut noter la présence systématique (et en nombre) des céramiques et des verres pour chaque couche. Enfin, certains matériaux se retrouvent dans les deux listes. De manière générale, on constate qu'il y a relativement peu de matériaux candidats dans chacune des listes et les aciers au carbone sont absents des listes. Ces constatations nécessitent quelques commentaires.

La première étape de la démarche conduit à sélectionner les céramiques en particulier comme constituant potentiel pour la couche externe. Cependant ces matériaux sont connus pour leur faible résistance au choc, ce qui les rendrait inopérables dans les conditions d'installation offshore. En effet, les canalisations sont transportées et manipulées avec les précautions d'usage correspondant au matériau robuste qu'est l'acier. Si la chute ou le choc involontaire d'une canalisation est dommageable pour une canalisation en acier, elle est catastrophique pour une céramique. Par conséquent, on peut remettre en cause ce choix de matériau pour la couche externe. Toutefois, la présence de solutions irréalistes n'est pas surprenant en phase de conception préliminaire. Le processus de conception est par nature itératif et il faut affiner ou corriger certaines données du problème. Ici, il est clair que c'est au cours de l'analyse fonctionnelle que l'on n'a pas pris en compte les sollicitations au choc lors du transport, du stockage et de la manipulation. Si on prend l'allongement à rupture comme indicateur de sensibilité à la résistance au choc, on constate que les céramiques sont éliminées de la liste de matériaux envisageables pour la couche externe et passe de 22 à 17 candidats.

Le second commentaire porte sur la présence d'une mousse isolante (phénolique) dans la liste de matériaux acceptables pour la couche externe ce qui paraît être en accord avec les solutions utilisées aujourd'hui dans l'industrie. Lorsqu'on observe les canalisations offshores isolées thermiquement, on parle souvent de la technologie « wet » ou de « wet insulation ». Derrière ce terme, on regroupe l'ensemble des technologies de lignes en acier recouvertes d'un isolant en contact avec l'eau de mer. Un exemple est donné en Figure 4-12.

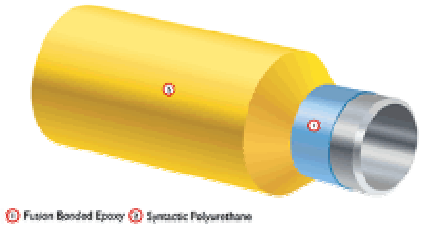


Figure 4-12 : Système d'isolation de canalisation ThermoFlo® de Bredero Shaw

Ces solutions classiques sont basées sur l'utilisation d'une mousse syntactique qui recouvre la canalisation en acier. Les mousses syntactiques sont des matériaux composites constitués de microsphères creuses, généralement en verre, entièrement noyées dans une résine. Outre leur faible masse volumique, ces matériaux se caractérisent par une résistance élevée à la pression et par de bonnes performances d'isolation thermique. De par leurs propriétés, les mousses syntactiques sont adaptées au transport d'hydrocarbure dans les conditions de l'offshore profond : elles permettent un compromis raisonnable entre la capacité d'isolation et la tenue aux

sollicitations mécaniques. D'après nos informations (fournisseurs et avis d'experts), les conduites en acier isolées par des mousses ne permettent pas d'atteindre simultanément toutes les spécifications techniques de notre problème. Par exemple, certaines mousses syntactiques polyuréthanes acceptent les contraintes de pression engendrées à 2000 ou 3000 mètres mais conduisent à des coefficients d'échange thermique de l'ordre de 2 $W.m^{-2}.K^{-1}$ (pour la conduite) alors que notre spécification impose 0,7 $W.m^{-2}.K^{-1}$. Nous verrons plus loin dans le processus de sélection si des solutions intégrant ce type de matériau sont envisageables.

Les matériaux composites stratifiés en fibre et résine polymère sont également présents dans les listes de matériaux pouvant répondre au problème. Les matériaux composites sont eux-mêmes des multimatériaux à une échelle inférieure à celle considérée dans notre étude. Ils intègrent la base de données comme les métaux, les polymères et les céramiques. Leur présence dans les solutions potentielles va dans le sens des nombreux travaux sur les matériaux composites dans l'offshore présentés dans l'étude de la bibliographie.

Certains matériaux comme le titane (label 311) sont présents dans les deux listes de constituants admissibles. Or les solutions monolithiques ne répondent pas au problème, elles devraient donc être éliminées. Il ne s'agit pas d'un retour en arrière dans le processus de conception. C'est la technique de filtrage employée qui explique cette situation : à ce stade de la sélection, on se trouve dans la situation où deux matériaux (même identiques) sont retenus a priori mais cela ne signifie pas que leur assemblage satisfait le cahier des charges. A cette étape préliminaire, nous avons considéré les couches comme parfaitement indépendantes. Il faut à présent combiner les informations sur les couches internes et externes pour constituer les solutions multimatériau. C'est l'objet de la seconde étape de filtrage appelée « identification des constituants du multimatériau ». (Cf. paragraphe 4.4.3.3)

La réduction progressive du nombre de solutions potentielles à analyser facilite le traitement de données. Au départ de la sélection du multimatériau à deux couches, et pour une base de données contenant 62 matériaux, le nombre de combinaisons à analyser s'élevait à 3782 (=62x62-62). Cette première opération de filtrage est assez efficace puisque l'on restreint l'espace de recherche à 295 (=18x17-11) combinaisons, en éliminant les solutions monolithiques et les céramiques en couche externe (matériaux sensibles au choc). Ces chiffres sont significatifs car en s'appuyant sur une procédure de sélection relativement simple, on réduit l'espace de recherche de

solutions de près de 92%.

En guise de bilan et avant de procéder à l'identification des constituants, on peut souligner que cette étape de filtrage préliminaire présente plusieurs avantages. Elle s'appuie sur des méthodes simples à mettre en œuvre ; elle permet le contrôle du processus de sélection (avec une vérification pas à pas des solutions potentielles), et diminue de façon significative le nombre de solutions à analyser. Un autre élément favorable est qu'à ce stade, le choix de matériaux correspond à une réalité industrielle avec la présence des mousses sur la couche externe mais également des matériaux composites qui ont fait l'objet de recherches intenses dans le passé.

4.4.3.3 Identification des constituants du multimatériau

Principe

L'identification des constituants du multimatériau consiste à éliminer chaque constituant qui ne trouverait aucun constituant complémentaire afin de satisfaire l'ensemble des requêtes fonctionnelles.

A l'étape précédente, on a créé des listes de matériaux admissibles pour chaque couche du multimatériau. A présent, il faut associer les matériaux de chaque liste, deux à deux, et vérifier que la combinaison peut éventuellement être acceptable.

Méthode de résolution

Le principe de la méthode repose sur le codage des matériaux. Un matériau ayant passé le filtre précédent ne respecte pas toutes les astreintes de conception c'est-à-dire qu'on peut mettre en évidence au moins deux astreintes incompatibles. On définit une astreinte dite de référence qui va servir de comparaison. On utilise alors un code binaire par matériau pour relier les informations relatives aux astreintes. Un matériau est donc codé par une série de 0 et de 1 : un 0 signifie que l'astreinte considérée n'est pas compatible avec l'astreinte de référence. La position des 0 et des 1 est importante car elle permet de repérer chaque astreinte de conception.

Prenons un exemple pour illustrer la méthode de résolution. Dans cet exemple, chaque matériau sera codé par quatre bits. On cherche à combiner un matériau M_1 codé par la série 1101 et un matériau M_2 codé par la série 0111. Pour le matériau M_1, il existe une incompatibilité entre l'astreinte de référence et la troisième astreinte de conception tandis que pour le matériau M_2 toutes les astreintes sont compatibles, sauf la première. En combinant ces deux matériaux, toutes les astreintes de conception pourront éventuellement être respectées (voir Figure 4-13).

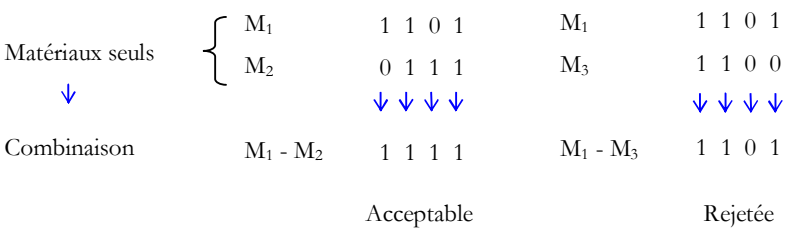


Figure 4-13 : Principe de recherche de combinaisons de matériaux admissibles

Si on combine les matériaux M_1 (codé en 1101) et M_3 (codé en 1101) alors l'association [M_1-M_3] sera codée 1101. La troisième astreinte n'étant pas satisfaite par l'association, ce multimatériau est rejeté.

On applique cette méthode de résolution au problème de conception traité. A titre d'exemple, on extrait plusieurs matériaux des listes de matériaux déjà sélectionnés sur les couches interne et externe. Pour chacun d'entre eux, on connaît les épaisseurs permettant de satisfaire les astreintes de conception. On utilise pour cela les modèles de comportement présentés en annexe III. On prend, pour la couche interne, deux matériaux composites à matrice organique avec renfort en fibre de carbone (label 201) et renfort en fibre de verre (label 202) et, pour la couche externe, une mousse polymère phénolique (label 203). Les résultats de dimensionnement sont présentés dans le Tableau 4-12.

Tableau 4-12 : Résultats de dimensionnement

		Groupe I					Groupe II		
		Résistance à l'installation	Flambage	Résistance en service	Isolation thermique	Non flottabilité	Charge en tête	Encombrement	
Label	Matériau	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Couche
201	Carbon Fib./Ep Lam.	8	19	4	1000	160	325	127	Interne
202	Glass Fib./Ep Lam.	22	34	10	1000	118	262	127	Interne
203	Phenolic foam	1000	171	1000	49	1000	127	127	Externe

La première étape de l'identification des constituants du multimatériau est le codage des matériaux.

On a déjà souligné la présence dans ce cahier des charges de deux groupes d'astreintes. Le premier groupe se compose des astreintes qui imposent une épaisseur minimale. Le second groupe impose une épaisseur maximale et se compose de deux astreintes liées à la charge en tête et à l'encombrement.

Dans notre cas, on définit l'astreinte d'encombrement comme astreinte de référence car on s'appuie sur le fait que cette astreinte doit toujours être satisfaite. De cette façon, on s'assure de ne pas imposer de contrainte supplémentaire au problème et il sera toujours temps, aux étapes ultérieures, d'éliminer les solutions inacceptables. Il est évident que cette méthode de codage serait plus délicate à mettre en œuvre si toutes les astreintes du second groupe dépendaient des propriétés matériaux.

Le codage s'effectue par comparaison des épaisseurs des astreintes imposant des épaisseurs minimales et l'astreinte de référence. Pour qu'une astreinte du premier groupe soit satisfaite, il faut que la valeur de l'épaisseur soit inférieure à celle imposée par l'astreinte d'encombrement.

Si on considère le tableau de résultats (Tableau 4-12), l'épaisseur maximale imposée par l'astreinte de référence impose une valeur seuil de 127 millimètres. En analysant l'astreinte portant sur la non flottabilité (cinquième colonne), on constate que l'épaisseur minimale nécessaire permettant de satisfaire cette astreinte est de 160 millimètres pour le composite à fibre de carbone (label 201). La conclusion est que l'astreinte sur la non flottabilité est incompatible avec l'astreinte imposant une valeur maximale (160>127). Le code de cette astreinte est donc 0.

On analyse cette fois le cas du composite à fibre de verre. L'épaisseur nécessaire pour que la conduite soit stable dans l'eau est de 118 millimètres. Cette valeur étant inférieure aux 127 millimètres requis par l'astreinte de référence, on peut conclure que ce matériau est compatible vis-à-vis de l'astreinte de non flottabilité et son code sera 1.

On a effectué ces mêmes opérations pour tous les matériaux retenus à la première étape sur les couches interne et externe et on présente un extrait de ces résultats de codage dans le Tableau 4-13. On montre également le résultat de la combinaison des matériaux.

Tableau 4-13 : Extrait du codage des matériaux et combinaison

Label	Matériau	Résistance à l'installation	Flambage	Résistance en service	Isolation thermique	non flottabilité	Couche
Codage							
201	Carbon Fib./Ep Lam.	1	1	1	0	0	Interne
202	Glass Fib./Ep Lam.	1	1	1	0	1	Interne
203	Phenolic foam	0	0	0	1	0	Externe
Combinaison							
	201 - 203	1	1	1	1	0	
	202 - 203	1	1	1	1	1	

L'association des matériaux de la couche interne (201 ou 202) et du matériau de la couche externe (203) montre que seule l'association composite verre (202) et mousse phénolique (203) est acceptable. L'association d'un matériau composite à fibre de carbone et d'une mousse phénolique est quant à elle rejetée : on constate que l'astreinte de non flottabilité ne peut pas être satisfaite contrairement au cas de l'association d'un composite à fibre de verre et d'une mousse phénolique.

Résultats et commentaires

En appliquant le principe du codage des matériaux, on trouve que le problème possède onze combinaisons (ou couples puisqu'il s'agit d'un bimatériau) de matériaux admissibles à 2000 mètres, ce qui réduit encore d'un facteur quinze l'espace de recherche de solutions. Les couples de matériaux candidats pour constituer le multicouche sont présentés dans le Tableau 4-14. Sur les dix-huit matériaux admis en couche interne (C1) à l'étape précédente, seuls cinq ont été retenus. Pour la couche externe (C2) on passe de dix-sept à cinq candidats.

Tableau 4-14 : Couples de matériaux identifiés comme candidats du multicouche à 2000 m

		Couche externe				
		202	203	304	311	312
Couche interne	202		√			
	203	√		√	√	√
	205	√		√	√	√
	304		√			
	311		√			

202	Epoxy Laminate (EP) - Glass Prepreg
203	Phenolic Foam: Closed Cell (0.080)
205	Polymethacrylimide Foam : Rigid PMACR 0.071
304	Cast austenitic stainless steel(ASTMCG-8M)
311	Near-alpha titanium alloy (6-2-4-2) (a)
312	Nickel Beryllium Casting Alloy CR-1, as cast

Afin de dégager des tendances de ces résultats, on a regroupé les solutions par classe de matériaux rentrant dans les combinaisons. Ainsi, on trouve quatre familles de multimatériaux acceptables à ce stade de la sélection (le premier matériau correspond à la couche interne, le second à la couche externe) :

- Métal / Mousse polymère,
- Composite (fibre + matrice organique) / Mousse polymère,
- Mousse polymère / Métal,
- Mousse polymère / Composite (fibre + matrice organique).

A l'évidence, ces résultats présentent certaines similarités. En effet, les deux premières

familles de multimatériaux combinent de la mousse polymère sur la couche externe et un métal ou un composite à renfort fibreux et matrice organique sur la couche interne. C'est l'inverse pour les deux dernières familles de multimatériaux. On propose ci-dessous une analyse de ces solutions.

Famille Métal / Mousse polymère :

La grande majorité des solutions industrielles existantes sont basées sur ce type de solutions (un exemple est présenté sur la Figure 4-12). Cependant on sait par ailleurs qu'elles sont absentes à de telles profondeurs c'est pourquoi ce résultat paraît discutable. Nous verrons plus loin, au cours de l'ultime étape de la sélection (dimensionnement du multimatériau), si ce type de solutions est maintenu parmi les solutions admissibles.

Famille Composite (fibre + matrice organique) / Mousse polymère :

La présence de cette famille de multimatériau semble discutable à ce stade de la sélection car on trouve deux arguments contradictoires à leur sélection. D'un côté, l'utilisation de matériaux composites se justifie car ces matériaux apportent simultanément légèreté et résistance mécanique ce qui bien souvent les rend plus attractifs que les métaux. D'un autre côté, les mousses polymères qui rentrent dans la constitution du multimatériau sur la couche externe ne sont généralement pas adaptées pour atteindre simultanément des niveaux de performance thermique et mécanique élevées. Une vérification est donc indispensable et nous étudierons leur comportement au cours de l'étape de dimensionnement.

Familles Mousse polymère / Métal ou Composite à matrice organique :

La présence de ces familles de solutions soulève des questions car les produits avec des mousses polymères sur la couche interne ne sont pas présents à notre connaissance sur le marché offshore à l'heure actuelle. Une limite relativement évidente de ces solutions est que les mousses polymères, au contact d'un fluide chaud et agressif, peuvent se dégrader au fil du temps. En effet, les canalisations sous-marines sont installées pour une période de 20 à 30 ans et il n'est en général pas prévu de les remplacer au cours de cette période. Les phénomènes de vieillissement ne sont pas pris en compte dans le cahier des charges car il est très difficile, à l'étape préliminaire d'estimer correctement les phénomènes de dégradation sur le long terme. Ces phénomènes résultent pour la plupart de couplages thermomécaniques et chimiques et peu de modèles de comportement sont disponibles dans la littérature [BOU07] : dans ce travail, l'auteur précise qu'il existe des modèles empiriques mais ils sont difficilement applicables dans notre démarche de conception. A ce niveau de la sélection, on peut envisager d'effectuer des études complémentaires sur le vieillissement de ces matériaux et valider si les solutions obtenues sont techniquement viables. Mais au préalable, nous allons poursuivre la démarche de conception jusqu'à son terme

en effectuant le dimensionnement des combinaisons puis en estimant leurs performances au travers de la fonction d'optimisation.

4.4.3.4 Filtrage des combinaisons admissibles

Principe

A l'issue de cette dernière étape de sélection, l'ensemble des couples de matériaux restants sont potentiellement des solutions du problème de conception.

La procédure de filtrage des combinaisons admissibles, pour les astreintes dépendant de l'épaisseur, nécessitera de dimensionner le multicouche. Pour un couple de matériaux, on calculera l'épaisseur de chaque couche nécessaire pour satisfaire les astreintes de conception. Pour une astreinte donnée, on connaîtra alors l'épaisseur totale du multicouche. C'est ce paramètre qui sera utilisé pour filtrer les solutions admissibles, le principe étant le même qu'en conception monolithique. Pour faciliter le filtrage, on rassemblera dans un premier groupe les astreintes qui imposent une épaisseur totale minimale et dans un second celles qui imposent une épaisseur totale maximale. On s'appuiera alors sur un principe utilisé en conception monolithique : pour qu'une solution soit acceptable, il faut que l'épaisseur totale imposée par l'astreinte dominant le premier groupe soit inférieure à l'épaisseur totale imposée par l'astreinte dominant le second groupe. Enfin, les astreintes indépendantes de l'épaisseur mais dépendant de la fraction volumique imposent des limites à cette fraction volumique.

On peut définir les variables libres du problème de deux façons : à partir de l'épaisseur de chaque couche ou à partir de l'épaisseur totale du multicouche et de la fraction volumique d'une des couches. Ces définitions n'influent pas sur le résultat, c'est l'écriture des modèles de comportement qui guide notre choix vers la seconde définition.

Méthode de résolution

A ce stade, nous avons établi que onze couples de matériaux peuvent remplir les exigences fonctionnelles. Nous allons maintenant vérifier si le comportement de ces multimatériaux permet d'atteindre le niveau des requêtes imposées par le cahier des charges. On utilise pour cela les lois de comportement couplé présentées en annexe IV. On analyse les solutions à la profondeur de 2000 mètres.

A l'aide d'un tableur standard, on fait évoluer la fraction volumique d'un des deux constituants (ici celui de la couche interne) et on calcule les épaisseurs permettant de satisfaire les astreintes de conception. Elles sont numérotées de 7 à 13 comme cela a été défini dans le Tableau 4-8.

La Figure 4-14 donne une vue d'ensemble de la procédure de filtrage pour un des couples

de matériaux retenu à l'étape précédente (203/311 – soit une mousse phénolique à l'extérieur et un alliage de titane à l'intérieur). Pour une fraction volumique donnée, par exemple 45%,

- on calcule pour chaque astreinte l'épaisseur permettant d'atteindre le niveau de l'astreinte (points $A_{(i)}$, avec i=7..13),
- on repère sur le graphique l'épaisseur maximale du groupe des astreintes imposant une épaisseur minimale. Pour ce groupe I (astreintes (7) à (11)), c'est le point $A_{(10)}$,
- on repère sur le graphique l'épaisseur minimale du groupe des astreintes imposant une épaisseur maximale. Pour le groupe II, c'est le point $A_{(13)}$,
- les solutions multimatériaux sont comprises entre les points $A_{(10)}$ et $A_{(13)}$.

Il faut rappeler que l'astreinte 6, résistance à la tension en tête, n'a pas encore été prise en compte : pour un couple de matériaux donné, cette astreinte ne fait intervenir que la fraction volumique. Elle impose donc un intervalle sur la fraction volumique.

Résultats et commentaires

A titre d'illustration, nous conservons le couple de matériau mousse phénolique (203) sur la couche externe et l'alliage de titane (311) sur la couche interne. Les résultats de la démarche exposée précédemment sont représentés sur le graphique de la Figure 4-14.

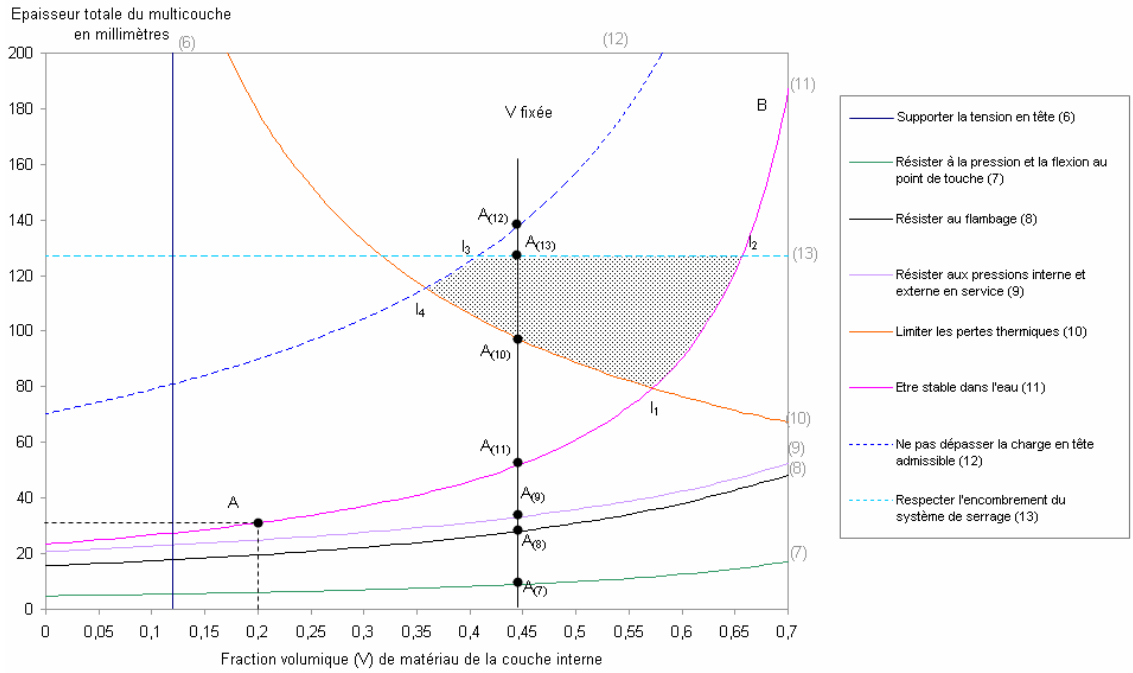


Figure 4-14 : Solutions multimatériau pour le couple 203-311 (2000 m)

Prenons l'astreinte de stabilité (courbe 11). Au point A ($v_1 = 20\%$), l'astreinte est satisfaite

si l'épaisseur totale du multicouche est d'environ 30 millimètres et la répartition en volume dans ce multicouche doit être de 20% pour l'alliage de titane (311) et le reste de mousse (203). Quand on augmente la fraction volumique de métal, on parcourt la courbe (11) pour arriver au point B. A cette extrémité, il faut un multicouche d'environ 186 millimètres pour satisfaire l'astreinte et les proportions en volume métal/mousse sont de 70-30%. Ceci s'explique par le fait que plus on augmente la proportion de mousse, plus l'épaisseur totale du multicouche augmente pour que la canalisation reste pesante dans l'eau donc stable dans l'eau.

Dans le groupe I, on trouve les astreintes (7) à (11) (en trait plein) qui imposent une épaisseur totale minimale à la canalisation. Les astreintes (12) et (13) (en pointillés) forment le groupe II et imposent une valeur d'épaisseur totale maximale. Cette figure montre que l'astreinte dominant chaque groupe évolue suivant la proportion en volume de mousse. Ainsi, l'astreinte portant sur les échanges thermiques (10) domine le groupe I jusqu'à l'intersection I_1 avec l'astreinte de non flottabilité qui est ensuite dominante. Le changement d'astreinte dominante intervient pour une proportion en volume de mousse d'environ 57%. On observe le même phénomène pour les astreintes du groupe II : jusqu'à 41% en volume de mousse, c'est la charge en tête admissible (12) qui domine l'astreinte sur l'encombrement imposé par le système de serrage (13) ; l'intersection est en I_3.

Pour un couple de matériau donné, s'il y a des solutions à 2000 mètres, cela signifie que l'astreinte dominant le groupe I donne une épaisseur inférieure à celle de l'astreinte dominant le groupe II : l'ensemble de solutions est compris dans un domaine délimité ici par les points $I_1I_2I_3I_4$. Il est donc possible de connaître les valeurs de fraction volumique et d'épaisseur totale des multimatériaux admissibles.

A ce stade, l'astreinte sur la résistance à la tension en tête (poids propre) a été prise en compte : dans le cas présent, cette astreinte implique que la fraction volumique de la couche interne doit être supérieure à 12%, ce qui n'a donc pas de conséquence sur le domaine de solutions présenté sur la Figure 4-14.

Le graphique de la Figure 4-15, directement tiré de la Figure 4-14 précédente, indique l'ensemble des solutions acceptables en termes d'astreintes et optimisées en terme d'épaisseurs totales pour les différentes fractions volumiques de C1 au sein du couple de matériaux étudié. On peut remarquer que l'épaisseur totale minimale du multicouche (203-311) est de 79mm (point I_1) et en ce point, la fraction volumique de mousse nécessaire est de 57%.

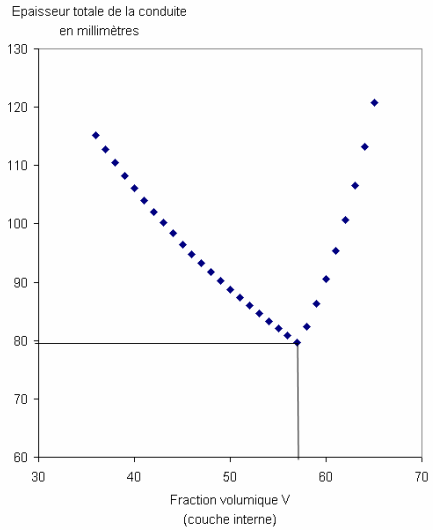


Figure 4-15 : Solutions multimatériau pour le couple 203-311 (2000 m)

Cette procédure a été étendue aux onze couples de matériaux admis à l'étape précédente. Les résultats (Tableau 4-15) montrent qu'à la profondeur de 2000 mètres, quatre bimatériaux sont rejetés. Il reste sept solutions à l'issue de la sélection. Lorsque l'étude est réalisée pour des profondeurs plus importantes (2500 et 3000m), on remarque que certaines solutions disparaissent de la sélection et il ne reste plus que cinq solutions. En particulier, les solutions utilisant de l'acier inoxydable sont rejetées ; en passant de 2500 à 3000 mètres, on observe une réduction de l'espace des épaisseurs.

Tableau 4-15 : Bilan des solutions (2000 m)

		Couche externe				
		202	203	304	311	312
Couche interne	202		√			
	203	√		√	√	√
	205	√		√	√	√
	304		√			
	311		√			

202	Epoxy Laminate (EP) - Glass Prepreg
203	Phenolic Foam: Closed Cell (0.080)
205	Polymethacrylimide Foam:Rigid PMACR 0.071
304	Cast austenitic stainless steel(ASTMCG-8M)
311	Near-alpha titanium alloy (6-2-4-2) (a)
312	Nickel Beryllium Casting Alloy CR-1, as cast

√ Solutions rejetées

√ Solutions admises

Dès la profondeur de 2000 mètres, toutes les solutions qui comportaient un constituant de la classe des matériaux composites à matrice organique ont été éliminées. Les solutions retenues appartiennent aux familles des mousses polymères/métaux et métaux/mousse polymères. Encore une fois, la pertinence de telles solutions peut être remise en cause. L'argument principal vient de la présence de mousse polymère en contact avec le fluide de production ou avec l'eau de mer. Au cours du temps, ces matériaux pourraient perdre leurs propriétés. Si on complète le cahier des charges avec un critère de vieillissement, alors les multimatériaux dont un constituant est une mousse polymère pourraient être rejetés et il n'y aurait pas de solutions bimatériaux au problème. Par conséquent, on pense qu'il n'est pas raisonnable de limiter l'étude à des solutions bimatériaux. Une extension de l'étude vers la recherche de solution à trois couches s'avère nécessaire. Mais au préalable, il semble intéressant de développer la méthode jusqu'à son terme au travers de l'étude de la performance des solutions sélectionnées.

4.4.3.5 Optimisation et classement

Principe

Cette étape comporte deux phases. D'abord l'optimisation de chaque multimatériau sélectionné, ensuite le classement des solutions optimisées. L'optimisation et le classement s'effectuent sur la fonction performance, qui dans notre problème est le coût matériau.

Méthode de résolution

Un multimatériau acceptable est défini par un couple de matériaux et un intervalle d'épaisseur de paroi du multicouche pour une fraction volumique donnée (ou inversement, un intervalle de fraction volumique pour une épaisseur totale donnée). Le résultat de l'optimisation est donc quasi immédiat puisque l'on possède une définition précise des solutions. En effet, pour chacune d'entre elles, on connaît l'épaisseur de chaque couche et on peut aisément calculer le coût matière associé.

Pour chaque couple de matériaux retenu aux étapes de sélection précédentes, on connaît la solution la plus performante. La comparaison des solutions au problème est réalisée en classant les solutions par ordre croissant du coût.

Résultats et commentaires

Le Tableau 4-16 donne le classement des solutions par ordre croissant de performance.

Tableau 4-16 : Classement des solutions à la profondeur de 2000 mètres

Label matériau sur couche		Coût total	Epaisseur totale	Fraction volumique de C1
interne	externe	EURO/m	mm	%
205	304	579	78	56
203	304	612	83	54
205	312	1688	63	72
203	312	1688	66	73
203	311	6596	80	57
205	311	6614	78	56
311	203	8546	113	36

Avec un coût de 579 euros par mètre, la solution la plus performante à 2000 mètres est la combinaison entre une mousse polyméthacrylate (205) en couche interne et un acier inoxydable (304) en couche externe. A la fin du classement, la combinaison alliage de titane/mousse phénolique est la plus coûteuse, dépassant 8500 euros par mètre de canalisation.

Selon nos sources, les solutions les plus performantes se situent dans un ordre de grandeur acceptable (le coût matière s'élève à quelques centaines d'euro par mètre de canalisation). Les solutions combinant des métaux alliés de nickel et de titane sont particulièrement chères pour le marché actuel. Néanmoins, nous avons largement insisté sur le fait que les solutions présentées dans ce tableau sont critiquables. Mais l'intérêt de passer au classement des solutions est qu'il offre un moyen raisonnable d'estimer la performance en termes de coût. Au-delà des aspects purement techniques, c'est un point essentiel pour décider d'une orientation stratégique de développement.

4.4.3.6 Application de la technique de résolution par satisfaction de contraintes (PSC)

Nous avons toutes les informations pour réaliser le choix de matériaux. Du point de vue de la conception d'un bimatériau, l'intérêt d'utiliser un outil basé sur la programmation par satisfaction de contraintes est donc limité. Néanmoins, l'application de l'outil sur un problème dont on connaît le résultat offre un bon moyen pour éprouver son fonctionnement.

A l'aide du solveur ECLiPSe et du programme présenté en annexe V, on réalise cette recherche de solutions. Les résultats sont satisfaisants car on retrouve les mêmes solutions au problème. On constate également que l'espace de solutions se réduit en augmentant progressivement la profondeur d'eau. Cette technique sera abordée plus longuement dans le paragraphe destiné à présenter la conception d'un multimatériau à trois couches.

4.4.3.7 Bilan

Au travers de cette étude de solutions multimatériaux à deux couches, nous avons pu

appliquer les principes de la méthode de conception proposée au chapitre 3. En guise de bilan et avant de passer à la recherche de solutions à trois couches, on peut tirer quelques enseignements de cette étude.

La méthode proposée permet de passer d'une description fonctionnelle d'un problème de conception à un ensemble de solutions potentielles. La conception admet un ensemble de principes constructifs notamment l'architecture multicouche axisymétrique et la participation conjointes des couches à une partie des astreintes de conception, l'autre partie des astreintes ne pouvant être affectée qu'à l'une des deux couches. Sur ces bases, on peut élaborer les modèles de dimensionnement pour chercher des solutions au problème de conception. Ce problème industriel multiastreinte est résolu à l'aide d'une méthode pas à pas qui suit une logique d'élimination progressive des solutions. Le bilan chiffré de cette méthode met en évidence la réduction de l'espace de recherche de solutions potentielles en fonction des étapes de la méthode proposée au chapitre 3. Le Tableau 4-17 rend compte de ces résultats obtenus lorsque la profondeur est fixée à 2000 mètres.

Tableau 4-17 : Réduction de l'espace de recherche de solutions (2000m)

	Couche interne	Couche externe	Nombre de combinaisons admissibles	Réduction de l'espace de recherche de solutions (%)
Base de donnée intitiale	62	62	3782	--
Filtrage préliminaire de la base de donnée	18	17	295	92,2
Identification des constituants du multimatériau	5	5	11	99,7
Filtrage des combinaisons admissibles	3	4	7	99,8

Ce tableau met en évidence que la première étape de filtrage est particulièrement discriminante dans ce problème de conception car l'espace de recherche de solution est réduit de plus de 92%.

On traverse successivement plusieurs étapes de sélection de matériaux pour ensuite réaliser le dimensionnement. On utilise les astreintes de conception pour réaliser les différentes opérations de filtrage d'abord en ne retenant que les constituants admissibles pour chaque couche (filtrage préliminaire de la base de données), ensuite en réunissant ces constituants au sein de combinaisons pour vérifier si elles sont acceptables (identification des constituants du multimatériau) et enfin en réalisant le dimensionnement du multicouche pour éliminer certaines solutions qui ne satisfont pas le cahier des charges (filtrage des combinaisons admissibles). Au cours de la dernière étape, on utilise les résultats obtenus à l'étape précédente afin procéder à l'optimisation et au classement.

La première technique utilisée pour résoudre le problème suit une démarche pas à pas.

Cette technique illustrée par des graphiques donne une vue détaillée du processus avec en particulier la possibilité de critiquer les combinaisons obtenues à l'issue de chaque étape. L'ensemble des contrôles est basé sur la comparaison avec les solutions industrielles disponibles ou pressenties pouvant répondant au besoin. On a une nouvelle fois vérifié que la conception est par nature itérative notamment parce que les données issues du cahier des charges doivent être vérifiées et corrigées tout au long du processus.

On a également utilisé la seconde technique de résolution proposée au chapitre 3 et qui exploite la méthode de programmation par satisfaction de contraintes. L'application de cette méthode de résolution de problème et d'optimisation donne des résultats satisfaisants car ils sont identiques à ceux obtenus avec la première technique. La seule différence vient de la maîtrise du processus. Avec la technique pas à pas réalisée à l'aide d'un tableur standard, l'utilisateur possède une meilleure vue des différentes étapes de filtrage mais cependant, cette technique peut parfois se révéler un peu lourde. Les solutions obtenues par la seconde technique sont plus difficiles à critiquer puisque l'on obtient directement les solutions optimisées et classées. L'intérêt de la seconde méthode de résolution est que l'on arrive très rapidement à un résultat ce qui rend cette voie particulièrement intéressante lorsque le cahier des charges change peu en termes de fonctions et que l'on souhaite seulement faire évoluer le niveau des critères.

La confiance dans les solutions bimatériaux n'étant pas totale, notamment pour des questions de durabilité, on oriente la conception vers la recherche de solutions à trois couches. Avec l'augmentation du nombre de couches, le problème devient plus complexe à résoudre en utilisant un simple tableur et il faut évoluer vers des techniques plus élaborées. On trouvera un bon terrain d'application de la technique de programmation par satisfaction de contraintes pour résoudre ce problème fortement combinatoire.

4.4.4 Conception multimatériau : solutions à trois couches

4.4.4.1 Traduction du problème de conception et modélisation

L'objet de la conception est une canalisation dont les trois couches sont repérées de l'intérieur vers l'extérieur : on note C1, la couche interne au contact avec le fluide de production, C2 est la couche intermédiaire et C3 est la couche externe au contact de l'eau de mer. Une solution est déterminée lorsque l'on connaît les matériaux affectés à chacune des couches ainsi que leurs épaisseurs respectives. L'**optimisation** des solutions porte sur la fonction coût matière.

Le problème possède trois **variables libres** à déterminer au cours de la conception. Ce sont les épaisseurs de chaque couche notée e_1, e_2 et e_3 relatives aux couches C1, C2 et C3.

L'affectation des **astreintes** de conception dépend de la position de la couche dans le multimatériau (Tableau 4-18). La couche interne, en contact avec le fluide de production, et la couche externe, en contact avec l'eau de mer, sont exposées aux agressions physique, chimique et thermique de ces milieux. La couche intermédiaire, par sa position dans l'empilement, est supposée être protégée de ces actions directes, exception faite des astreintes pour la résistance aux températures. La conception s'appuyant sur le principe de la combinaison des propriétés des matériaux, les astreintes restantes (dépendantes entre autres de la variable libre) sont affectées à toutes les couches de façon couplée.

Tableau 4-18 : Affectation des astreintes de conception

N°	Dénomination des astreintes de conception	Couches		
		C1	C2	C3
01	Température de service minimale	√	√	√
02	Température de service maximale	√	√	√
03	Résistance aux acides forts	√		
04	Résistance à la corrosion	√		√
05	Résistance à l'usure			√
06	Résistance à la tension (poids propre)	√		
07	Résistance à l'installation (pression – flexion)	√		
08	Résistance au flambage	√		
09	Résistance en service (pression)	√		
10	Isolation thermique	√		
11	Stabilité dans l'eau (flottabilité)	√		
12	Charge en tête admissible	√		
13	Système de serrage	√		

√ indique si l'astreinte est affectée à la couche

Les **modèles de comportement** nécessaires au dimensionnement sont identiques à ceux utilisés pour le cas de conception à deux couches. Ils sont présentés en annexe IV.

Démarche de résolution

La démarche de résolution suit les étapes proposées dans le chapitre 3 avec l'idée sous jacente d'éliminer progressivement les solutions inacceptables. L'application pratique de cette méthode peut être difficile lorsque l'espace de recherche de solutions susceptibles de satisfaire le besoin est particulièrement vaste. On appliquera un outil adapté aux problèmes combinatoires.

4.4.4.2 Filtrage préliminaire de la base de données

Si on considère la base de données de 62 matériaux alors, rechercher des solutions multimatériaux à trois couches, revient à analyser environ 240 000 combinaisons potentielles. Avec l'aide des moyens informatiques actuels, l'analyse systématique de toutes ces permutations est une opération réalisable. Mais, pour parvenir plus rapidement au résultat, on préfère limiter la recherche aux solutions les plus probables. Cette opération de filtrage préliminaire consiste à sélectionner les matériaux susceptibles de rentrer dans la constitution du multimatériau. Elle découle de l'affectation des astreintes de conception sur les différentes couches proposée au paragraphe précédent.

Cette opération est réalisée en suivant le principe de filtrage énoncé au paragraphe 3.2.4. On s'appuie aussi sur les conclusions de la recherche de solutions bimatériau qui permettent d'écarter certains matériaux de la sélection : les céramiques sur chaque couche et les mousses polymères sur la couche interne ne seront pas considérées dans la sélection.

On établit une liste de matériaux admissibles pour chaque couche du multimatériau. Le résultat est donné dans le Tableau 4-19. On présente les matériaux admissibles pour les couches C1 et C3 pour lesquelles il y a respectivement 10 et 17 matériaux candidats. Pour la couche C2, il y a 45 matériaux admissibles soit prés de 73% de la base de données d'origine.

Tableau 4-19 : Liste de matériaux ayant passé le filtre préliminaire (Profondeur 2000m)

Couche interne (C_1)		Couche externe (C_3)	
Label	Matériau	Label	Matériau
201	Epoxy Laminate (EP) - Carbon Prepreg	201	Epoxy Laminate (EP) - Carbon Prepreg
202	Epoxy Laminate (EP) - Glass Prepreg	202	Epoxy Laminate (EP) - Glass Prepreg
304	Cast austenitic stainless steel (ASTM CG-8M)	203	Phenolic Foam: Closed Cell (0.080)
311	Near-alpha titanium alloy (6-2-4-2) (a)	304	Cast austenitic stainless steel (ASTM CG-8M)
405	Polychloroprene (CR) Neoprene	311	Near-alpha titanium alloy (6-2-4-2) (a)
407	Silicone (SIL) elastomers	312	Nickel Beryllium Casting Alloy CR-1, as cast
410	Polyester (PES) - casting / flexible	401	Butyl Rubber, unfilled
417	Poly TetraFluoro Ethylene (PTFE)	403	Isoprene (IR) - unfilled
418	Polycarbonate (PC)	405	Polychloroprene (CR) Neoprene
421	Polypropylenes (PP)	407	Silicone (SIL) elastomers
		408	Epoxies (EP), rigid
		410	Polyester (PES) - casting / flexible
		417	Poly TetraFluoro Ethylene (PTFE)
		418	Polycarbonate (PC)
		419	Polyether ether ketone (PEEK)
		420	Polyethylene terephthalate (PET)
		421	Polypropylenes (PP)

Cette opération se révèle efficace car il reste à analyser un peu moins de 8 000 combinaisons sur les 240 000 combinaisons envisageables. C'est environ 3% de l'espace de recherche initial.

Les analyses réalisées à 2500 et 3000 mètres montrent que ces opérations de filtrage conduisent à la sélection des mêmes matériaux pour chaque couche. On prendra ces listes intermédiaires pour la recherche de combinaisons de matériaux.

4.4.4.3 Identification des constituants du multimatériau et filtrage des combinaisons admissibles

Méthode

Au chapitre 3, nous avions souligné qu'il était plus difficile de résoudre le problème de conception lorsque le nombre de variables libres du problème augmentait (voir paragraphe 3.3.3.1). C'est le cas ici car le passage de deux à trois couches augmente nettement la dimension de l'espace de recherche de solutions. Nous avions alors proposé d'appliquer une technique de programmation par contraintes pour explorer cet espace et déterminer les solutions acceptables.

Par conséquent, les étapes d'identification des constituants et de filtrage des combinaisons admissibles sont réalisées à l'aide d'un programme établi en Prolog et proposé en annexe V. Le problème est ensuite résolu avec le solveur ECLiPSe. La hauteur d'eau évoluant dans la zone de l'ultra profond, trois calculs successifs sont réalisés aux profondeurs Ho de 2000, 2500 et 3000 mètres.

Ces analyses conduisent à un ensemble de solutions au problème. On entend par solution, une combinaison de trois matériaux et la définition de l'épaisseur relative à chaque couche. Pour un triplet de matériaux donné, il existe a priori plusieurs solutions selon l'épaisseur de chaque couche. Les solutions devront ensuite être optimisées puis classées selon leur performance (le coût matière).

Présentation des résultats

En résolvant le problème de conception par programmation par satisfaction de contraintes, on balaye l'espace de solutions pour chaque triplet de constituants. Selon la finesse de discrétisation des variables d'épaisseur, le balayage sera plus ou moins précis, et donnera un nombre plus ou moins important de solutions au problème. Un incrément de cinq millimètres a été choisi pour discrétiser les variables d'épaisseur. La résolution du problème conduit à un total de 8318 solutions à 2000 mètres de profondeur, tous multimatériaux confondus. En choisissant un incrément de deux millimètres, le nombre de solutions est six fois plus important pour un temps de calcul quatre fois plus grand. L'écart sur la fonction objectif étant inférieur à 10%, on

considère que la précision du résultat est suffisante à une étape de conception préliminaire et l'incrément de cinq millimètres sur la variable d'épaisseur se justifie pour la suite de l'étude.

Il convient, pour l'interprétation des résultats, de bien distinguer les solutions et les combinaisons de matériaux acceptables. Les solutions au problème intègrent les combinaisons de matériaux acceptables ainsi que le dimensionnement. Dans ce paragraphe, nous focaliserons notre attention sur les combinaisons acceptables car elles sont moins nombreuses et ce sont des informations plus faciles à manipuler que les solutions. Les solutions seront étudiées plus précisément à l'étape d'optimisation et de classement qui nécessite le calcul de la fonction objectif et donc le dimensionnement. Enfin, pour prendre encore du recul sur les résultats, nous proposons de définir les « familles de multimatériaux acceptables » : ce sont les combinaisons de classes de matériaux qui satisfont les requêtes.

La Figure 4-16 rappelle ces notions introduites pour favoriser l'interprétation des résultats.

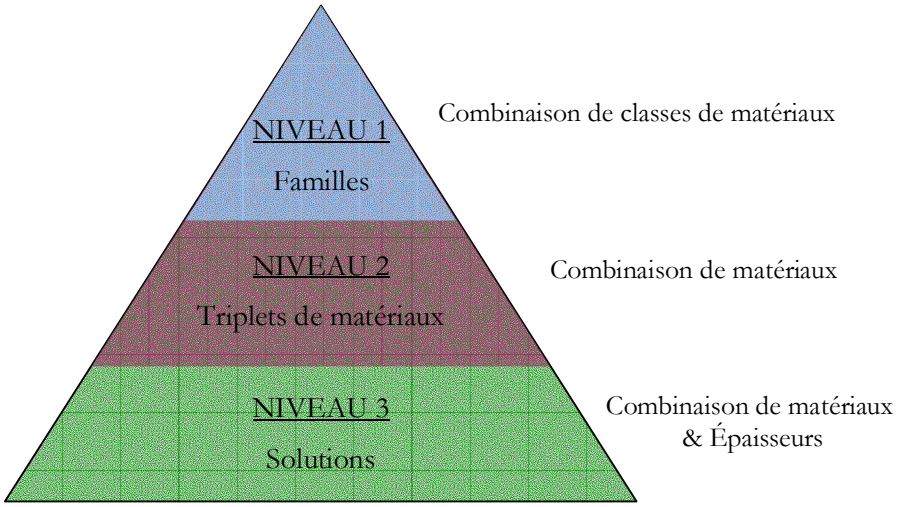


Figure 4-16 : Découpage des résultats

On considère au premier niveau les familles de multimatériaux. Un exemple de famille est la combinaison métal/mousse/polymère. Au second niveau, plus détaillé que le premier, on dénombre les triplets de matériaux de chaque famille. Un triplet de matériaux est par exemple constitué des matériaux A, B, et C. Chaque constituant est repéré suivant sa position dans l'épaisseur. Ainsi, on fait une différence entre le multimatériau A/B/C et le multimatériau B/A/C car l'ordre des couches agit nécessairement sur le comportement. Enfin, un troisième niveau contient les solutions du problème c'est-à-dire les triplets de matériaux et les épaisseurs correspondantes ; elles seront analysées dans le paragraphe 4.4.4.4.

Le Tableau 4-20 donne les résultats obtenus par les analyses aux différentes profondeurs à 2000, 2500 et 3000 mètres.

Tableau 4-20 : Résultats de la sélection pour les profondeurs 2000, 2500 et 3000 mètres

Profondeur (en mètres)		2000	2500	3000	Tendance[2]
Niveau 1 :					
Nombre de familles de multimatériaux retenus		5	5	5	→ ---
Niveau 2 :					
Nombre total de combinaison de matériaux		64	58	48	↘ - 25%
01	*Métal / Mousse polymère / Métal*	*8*	*8*	*4*	↘↘ *-50%*
02	*Métal / Mousse polymère / Composite[1]*	*4*	*3*	*2*	↘↘ *- 50%*
03	*Composite[1] / Mousse polymère / Métal*	*8*	*8*	*8*	→ *0%*
04	*Métal/ Mousse polymère / Polymère*	*20*	*15*	*10*	↘↘ *-50%*
05	*Polymère / Mousse polymère / Métal*	*24*	*24*	*24*	→ *0%*
Niveau 3 :					
Nombre total de solutions		8318	5986	3964	↘↘ - 52%

[1] Matériaux composites de type stratifié de fibres organiques unidirectionnelles et de résine polymère.
[2] Mesure de l'évolution entre 2000 et 3000 mètres.

Au premier niveau, les résultats présentent cinq familles de multimatériaux distinctes quelle que soit la profondeur d'eau. On pouvait dénombrer au départ 27 possibilités en combinant les classes de matériaux de chaque couche. Le problème de conception semble donc assez bien posé car le nombre de résultats admissibles est ni trop faible ni trop important. En outre, ces résultats laissent supposer que certaines de ces familles sont assez robustes car elles ne semblent pas dépendre de la profondeur. Pour en juger, il faut analyser les résultats en descendant à un niveau de détail supérieur.

Avec environ 8 000 combinaisons potentielles avant le filtrage, il y a seulement 64 triplets de matériaux acceptables à 2000 mètres après le filtrage. L'analyse à 3000 mètres réduit encore le domaine de résultat de 25% par rapport à la profondeur de 2000 mètres avec 48 triplets admissibles. La tendance générale est que le problème admet un nombre de combinaisons relativement réduit, et plus la profondeur augmente, plus ce choix est limité.

Au troisième niveau, on considère le nombre de solutions obtenues. Il y a une baisse significative de l'ordre de 50% entre 2000 et 3000 mètres. Pour comprendre quelles en sont les raisons, nous analysons d'abord les résultats par familles de multimatériaux.

Pour cette analyse, notre guide de réflexion repose sur un certain nombre de questions auxquelles on souhaite apporter des réponses: Est-il raisonnable d'obtenir de tels résultats ? Dans quelle mesure peut-on comparer ces résultats avec les technologies actuellement utilisées dans l'industrie ? Quelles sont les conséquences de ces choix de matériau sur la conception des extrémités, sur la mise en œuvre ? Notre objectif n'est pas de fournir des réponses exhaustives à ces questions. Nous souhaitons cependant mettre en évidence certains points pouvant faire l'objet d'études ultérieures.

Analyse globale commune aux différentes familles de multimatériaux

Sur les cinq familles de multimatériaux retenus, on remarque d'emblée la présence systématique d'une mousse polymère sur la couche intermédiaire (C2). C'est un résultat intéressant à double titre. D'abord, ce type de conception est proche des canalisations de type Pipe-In-Pipe, très répandu dans l'industrie. Il s'agit d'une configuration à trois couches souvent utilisée pour la construction de canalisations hautement isolées. Dans ce type de configuration particulière, on peut dire pour schématiser que les couches internes et externes supportent les efforts mécaniques et les actions physico-chimiques de l'huile de production et de l'eau de mer. Elles sont en acier au carbone dont la limite d'élasticité se situe autour de 450MPa. L'espace annulaire est occupé par un isolant thermique ayant de très bonnes propriétés thermiques. Certains de ces isolants présentent des conductivités thermiques de l'ordre de $10mW.m^{-1}.K^{-1}$ et fonctionnent parfois sous un vide partiel. Ensuite, les résultats de cette étape de sélection montrent que toutes les solutions admissibles comportent une couche intermédiaire thermiquement isolante : de ce fait, on va pouvoir reconsidérer l'affectation de certaines astreintes de conception. La couche externe étant isolée thermiquement du fluide de production par une couche intermédiaire, il n'est plus nécessaire de considérer l'action des températures de services sur cette couche. On a effectué une itération sur la première étape (filtrage préliminaire) en supprimant ces astreintes sur la couche externe. Le résultat montre que l'on peut maintenant considérer dix polymères supplémentaires sur la couche externe.

Nous allons maintenant approfondir l'analyse famille par famille.

Famille Métal/Mousse Polymère/Métal

Il est surprenant de voir apparaître parmi les résultats la famille du type Métal/Mousse polymère/Métal car on sait par ailleurs qu'elles ne sont pas appliquées à de telles profondeurs. Il faut lister les matériaux en détail pour comprendre de tels résultats. Les métaux susceptibles de satisfaire le besoin sont l'acier inoxydable, l'alliage de titane ou de nickel. On constate que les solutions traditionnelles sont bien éliminées car l'acier au carbone est absent de cette liste. C'est

un résultat cohérent avec la réalité industrielle. Toutefois, il est important d'évaluer la pertinence des autres solutions proposées.

A notre connaissance, seul l'alliage de titane a été utilisé dans l'industrie offshore pour construire des canalisations sous-marines. C'était pour une application particulière liée aux activités de forage. Ces canalisations sont récupérées après chaque opération et on utilise des connexions visées pour réaliser les assemblages en mer. Ces éléments peuvent justifier le coût important du titane et ce point sera vérifié au cours de la prochaine étape d'optimisation et de classement.

L'alliage de nickel et l'acier inoxydable ne sont pas utilisés dans l'industrie offshore. Ce sont des matériaux assez proches en termes de propriétés car le nickel est allié au fer pour produire les aciers inoxydables. Leurs propriétés sont remarquables dans les conditions extrêmes de température et d'agression chimique. Leur tenue à la corrosion en fait de bons candidats pour les applications offshores et cette propriété peut expliquer la présence de ces solutions. Nous avons souhaité appliquer une norme de conception de canalisation sous-marines afin de vérifier la cohérence entre nos résultats de sélection et la réglementation industrielle. La norme appliquée est celle du DNV (DNV OS F101), qui est un organisme de normalisation faisant référence dans l'industrie offshore. Cette norme permet de réaliser le dimensionnement mécanique de la canalisation : le tube interne est généralement dimensionné à l'éclatement tandis que le tube externe doit supporter la pression hydrostatique avant de flamber. Ensuite, on vérifie que les contraintes thermiques sont satisfaites. A ce niveau, on doit faire une remarque importante sur ce type de conception car elle sous-entend, au moins au niveau du pré dimensionnement, que les couches travaillent indépendamment les unes des autres. Notre approche de conception est différente car nous considérons que l'ensemble des couches participe pour satisfaire les astreintes de conception. Par conséquent, il paraît assez délicat de tenter une comparaison directe entre nos résultats de sélection et ceux issus de l'application des règles industrielles. L'application de la norme du DNV confirme ce point car les solutions utilisant des aciers standardisés ne sont plus applicables au-delà de 1850 mètres. Ce calcul est réalisé en considérant une surépaisseur de corrosion de cinq millimètres sur le tube externe. Si on considère que le matériau est résistant à la corrosion, on peut supprimer la surépaisseur de matière habituellement ajoutée. L'effet sur la profondeur de pose est positif puisqu'on atteint la profondeur 2300 mètres, néanmoins ce résultat est encore loin des 3000 mètres obtenus par notre approche. Toutefois, on peut accepter ces solutions mais au cours des études ultérieures, il faudra vérifier que la technologie de mise en œuvre permet de réaliser une cohésion correcte entre les différents matériaux du multicouche. Enfin, comme le choix d'utiliser une surépaisseur de matière comme protection à la corrosion

n'est pas expressément décrit dans le cahier des charges, il est naturel de ne pas trouver ce type de solution. On pense cependant que la méthode telle qu'elle est proposée pourrait permettre d'atteindre ce type de solution en distinguant la zone sacrificielle de la zone structurale.

Avant d'analyser les autres familles de multimatériaux obtenus, il faut faire une dernière remarque sur un point récurrent dans la conception des canalisations que nous n'avons pas encore abordé dans cette étude : il s'agit de choix de la méthode de connexion des canalisations. En effet, notre approche permet et se limite au choix de matériaux pour la partie courante sans prendre en compte la conception des extrémités. Or, c'est un aspect particulièrement important dans le cycle de vie de la canalisation car, au-delà de la vérification de la capacité de tensionnement, il faut évaluer les techniques et établir les procédures de connexion offshore. Une méthode répandue pour l'installation de lignes par « pose en J » consiste à souder les tubes bout à bout. Lorsqu'il y a deux tubes coaxiaux, comme dans le cas du Pipe-In-Pipe, une première technique consiste à souder les tubes internes en position verticale puis on rapproche les tubes externes pour réaliser la seconde soudure. Une seconde technique, qui est une optimisation de la première, consiste d'abord à relier les tubes internes et externes à leurs extrémités. Cette opération peut être réalisée à terre. Ensuite il n'y a plus qu'une seule opération de soudure à réaliser en mer ce qui permet un gain de temps et d'argent. La continuité de l'isolation est ensuite réalisée par la mise en place d'un manchon d'isolation thermique à l'endroit de la soudure. Quelle que soit la technique employée, on constate que le soudage est la seule méthode d'assemblage utilisée pour ce type de canalisation. Elle est bien adaptée à l'acier au carbone mais elle est plus difficilement applicable aux aciers inoxydables qui possèdent une soudabilité limitée. Par conséquent, si on souhaite conserver ce choix de matériaux, il faudra développer une technique d'assemblage adaptée, différente de celle couramment utilisée. Eventuellement, il faudra remettre en cause la méthode de pose en J. Ces remarques sont valables quel que soit le choix de matériaux alternatifs. On reviendra sur ce point en conclusion.

Familles Métal/Mousse Polymère/Composite et Composite/Mousse Polymère/Métal

On traite en commun ces deux familles de multimatériaux car ils présentent des similitudes évidentes. Tout d'abord, la présence de ces familles dans la sélection confirme que notre approche permet de retrouver des solutions qui ont intéressé un grand nombre de scientifiques et d'industriels au cours des trente dernières années. Ce résultat est donc encourageant mais il n'est pas suffisant pour valider notre approche. Ensuite, le choix de disposer un composite à renfort fibreux soit sur la couche externe soit sur la couche interne doit être discuté.

Les matériaux composites présents dans la base de données représentent une fraction très

faible du champ des possibilités offert habituellement par ces matériaux. On pourrait s'attendre à un nombre plus important de solutions utilisant les matériaux composites mais la limitation provient de la structure de notre approche. En effet, nous basons notre démarche sur l'exploitation d'une base de données. C'est le cœur de la connaissance exploitée dans la méthode et elle n'évolue pas au cours de la conception. Or, les propriétés d'un matériau composite ne peuvent pas être figées dans une configuration donnée. Il est possible de donner un ensemble de propriétés représentatives de leurs comportements, et on en tire un grand avantage car on peut les intégrer facilement dans la base de données, mais nous savons par ailleurs que cette approche ne permet pas d'exploiter le potentiel de ces matériaux. Pour s'en approcher, on pourrait enrichir la base de données existante avec d'autres matériaux composites. Il y a de nombreux paramètres sur lesquels on devra alors jouer : le nature des fibres, l'architecture du renfort, la nature de la résine, l'orientation des plis, la fraction volumique de constituants. A l'évidence, les possibilités sont grandes or la base de données est par définition un ensemble fini. Un compromis simple serait d'ajouter quelques matériaux composites représentatifs. La base existante contient seulement deux matériaux composites unidirectionnels à matrice époxyde, le premier avec renfort en fibre de verre, le second avec renfort en fibre de carbone. L'orientation des fibres jouant un rôle particulièrement important sur le comportement, on pourrait ajouter des stratifiées [0°, 90°, +/-θ°] et de cette façon, voir apparaître d'autres solutions. Mais il ne s'agit que d'un compromis et il faudrait réfléchir au moyen d'intégrer une sélection des matériaux composites dans notre approche. Pour y parvenir, on entrevoit un certain nombre de difficultés parmi lesquelles le changement d'échelle d'observation et la gestion des données.

Ces considérations d'ordre méthodologique ayant été abordées, nous devons également revenir sur une critique des solutions proposées par la méthode. En conception composite, on doit suivre un certain nombre de règles. Une des règles fondamentales consiste à respecter la nature anisotrope du matériau. Les concepteurs ne doivent pas reproduire les mêmes règles que celles qu'ils ont l'habitude de suivre pour concevoir un objet métallique. Les propriétés des matériaux composites sont différentes dans le sens transverse aux fibres et dans le sens longitudinal, de même que les propriétés en compression sont différentes et également plus faibles qu'en traction. Par conséquent, même si les solutions proposées par la méthode étaient comparables en termes de coût (nous aborderons ce point ultérieurement) nous pouvons déjà émettre certaines réserves sur les modèles simplifiés de comportement, et donc sur les solutions qui proposent un matériau composite sur la couche externe.

Pour finir sur ces types de solutions, nous devons faire une remarque sur la conception des extrémités et les méthodes de mise en œuvre. Encore une fois, pour tirer un plein avantage des

matériaux composites, nous devons rappeler une règle de conception fondamentale. Le concepteur doit garder à l'esprit que les exemples de conception composite réussis sont basés sur l'intégration des fonctions. Dès lors, c'est tout le cycle de vie de la structure qu'il faut considérer d'emblée en s'affranchissant des barrières imposées par les solutions existantes. La conception des extrémités des tronçons de canalisation ne fait pas exception à cette règle. En effet, la méthode de pose traditionnelle consiste à souder bout à bout des tronçons de tubes de 50 mètres. Si on s'oriente vers un choix de matériaux composites, il faudrait pouvoir simplifier la conception en éliminant ou en limitant toutes ces connexions. Par conséquent, la conception des extrémités doit nécessairement remettre en cause la méthode de pose en mer.

Familles Polymère/Mousse Polymère/Métal et Métal/Mousse Polymère/Polymère :

Comme précédemment, on constate une forte similitude entre ces deux familles de multimatériaux. Pour accepter définitivement ces solutions certaines études complémentaires doivent être menées. En particulier, les investigations futures devront s'attacher à valider le comportement mécanique du multicouche et sa tenue dans le temps. Ces études sont fortement dépendantes de la faisabilité de fabrication de l'objet.

Notre conception du multimatériau suppose que toutes les couches travaillent simultanément pour satisfaire les astreintes de conception. Seules certaines d'entre elles comme la tenue aux agressions chimiques par exemple, ne sont supportées que par les couches interne et externe. Les modèles de comportement élaborés pour cette étude préliminaire sont relativement simples. De cette façon on a pu proposer un premier choix de matériaux. On a supposé que la transmission des efforts entre les couches était parfaite et que chacune des couches était peu déformable. Il faut évaluer si ce modèle de comportement correspond à une réalité physique et si c'est le cas, il faudra vérifier que cela est compatible avec une fabrication industrielle.

En faisant référence aux conclusions du paragraphe 4.4.3.3 (page 120), il faut s'assurer également que les solutions proposées répondent favorablement aux critères sur le vieillissement.

A une étape préliminaire, ces hypothèses simplificatrices étaient indispensables pour proposer un premier choix de matériaux. Pour toutes les raisons évoquées dans ce paragraphe, il semble nécessaire de valider le comportement du multicouche avec un polymère en couche interne ou externe. Cette évolution du processus de conception est classique, partant du général et en allant dans le détail, l'objet est ici présenté de façon grossière, l'étape suivante consiste à le décrire plus finement.

Bilan intermédiaire

Le principal résultat de cette analyse est de mettre en avant la nécessité de conduire des

études complémentaires pour confirmer la pertinence des solutions obtenues après le filtrage. Cinq familles de multimatériaux peuvent être envisagées comme des solutions au problème et il faudra envisager après la dernière étape (optimisation et classement) de valider les modèles de comportement, d'étudier la faisabilité de fabrication industrielle, de se pencher sur la conception des extrémités et proposer une méthode d'installation adaptée.

4.4.4.4 Optimisation des épaisseurs et classement des solutions

Méthode

Pour chaque multimatériau, on procède à l'optimisation des épaisseurs en fonction de l'objectif de performance. A titre d'exemple, pour 2000 mètres, les solutions du triplet « Stainless steel (304) – Polyurethane foam (207) – Butyl Rubber unfilled (401) » sont représentées sur la Figure 4-17.

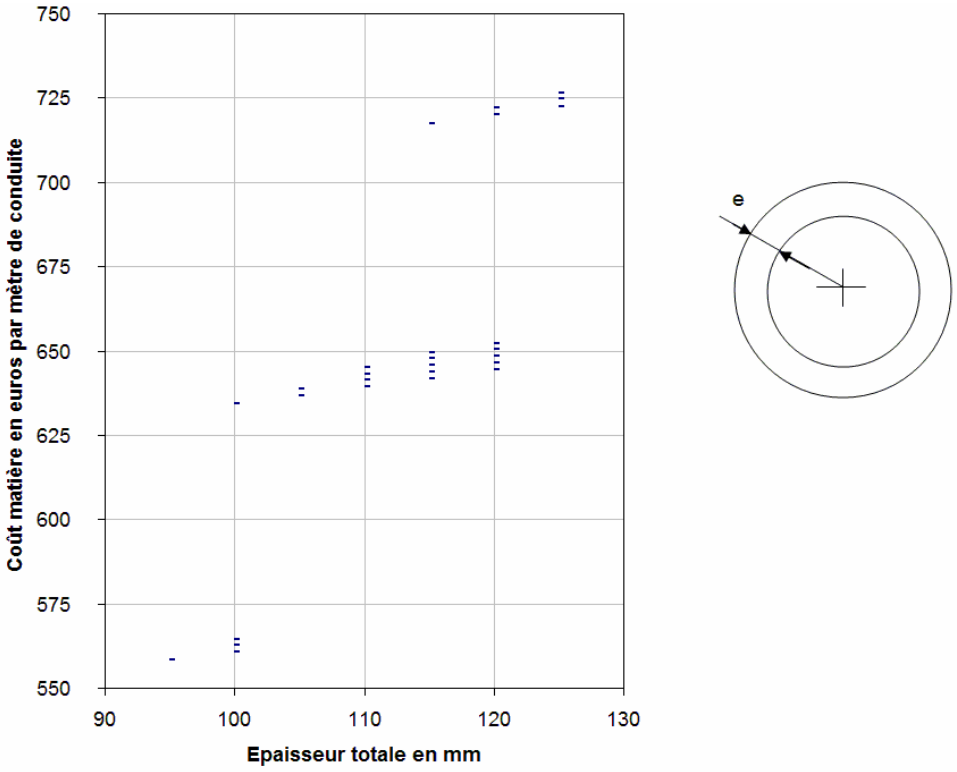


Figure 4-17 : Solution au problème à 2000 mètres pour le multimatériau constitué des couches 304-207-401 (304 : Stainless steel , 207 : Polyurethane foam, 401 : Butyl Rubber unfilled)

Les 27 points de cette figure représentent des solutions au problème pour le triplet de matériaux considéré. L'épaisseur du multimatériau-solution varie entre 95 et 125 mm pour un coût allant de 558 à 727 euros par mètre de canalisation. La performance recherchée étant l'optimisation du coût matière, il reste à extraire, pour cette combinaison, la solution qui minimise

le coût et à l'évidence le point situé en bas à gauche est la solution la plus performante pour le triplet donné. Ainsi pour ce multimatériau, la solution la plus performante, c'est-à-dire la solution optimisée pour le triplet 304-207-401, est une canalisation de 95 mm d'épaisseur de paroi et d'un coût au mètre de 558 euros. Pour 2000 mètres, on trouve ainsi un ensemble de 64 triplets distincts optimisés.

En réitérant cette recherche d'optimum, pour les profondeurs de 2500 et 3000 mètres, on obtient respectivement un ensemble de 58 et 48 solutions distinctes optimisées.

Présentation des résultats

Cette optimisation a été réalisée pour l'ensemble des combinaisons de multimatériaux obtenues par le calcul et le résultat est donné dans le Tableau 4-21. La colonne « N » donne le nombre de solutions et les colonnes « min » et « max » donne les optimums de conception pour les familles de multimatériau et en fonction de la profondeur.

Tableau 4-21 : Résultats de conception de multimatériaux à trois couches

Profondeur en mètres		2000			2500			3000		
Coût matière en euros par mètres		N	min	max	N	min	max	N	min	max
01	métal/mousse/métal (moyenne)	8	991 (3042)	7380	8	1090 (3082)	7380	4	2844 (4961)	7380
02	métal/mousse/composite (moyenne)	4	599 (3716)	8148	3	599 (4725)	8148	5	5428 (6788)	8148
03	composite/mousse/métal (moyenne)	8	**558** (4446)	7334	8	2020 (4564)	7334	8	2100 (4641)	7334
04	métal/mousse/ polymère (moyenne)	20	**558** (3817)	8961	15	**558** (4830)	8961	10	4296 (7071)	8961
05	polymère/mousse/métal (moyenne)	24	1541 (4150)	7802	24	2075 (4362)	7802	24	**2075** (4362)	7802
Bilan		64	**558**	8961	58	**558**	8961	48	**2075**	8961

Il est difficile, à ce stade de la recherche de solution, d'opter pour une seule de ces familles de multimatériaux de manière catégorique. En effet, nous avons choisi le critère du coût matière comme paramètre d'optimisation. Or on sait par ailleurs que ce paramètre est loin d'être suffisant pour représenter la réalité industrielle. On s'attend à avoir de grandes variations en termes de coût final car le coût matière ne représente qu'une partie du coût total. En particulier, il faudrait ajouter les coûts de fabrication et d'installation. Ces éléments doivent être évalués notamment lors du choix de la méthode de mise en œuvre, de la conception des extrémités et du choix de la méthode de pose. Une analyse technico-économique pourra aider à orienter le choix de conception. Toutefois, il est possible de faire quelques commentaires préliminaires sur les

solutions retenues.

1- Selon la profondeur, les solutions optimales n'appartiennent pas à la même famille de multimatériaux : à 2000 mètres, les familles (03) et (04) composite/mousse/métal et métal/mousse/polymère sont compétitives, à 2500 mètres, cette dernière famille est la plus performante, tandis qu'à 3000 mètres, le choix s'orienterait vers une solution appartenant à la famille (05) polymère/mousse/métal. En fait, certaines nuances de matériaux sont éliminées à l'étape de filtrage ; par exemple, l'acier inoxydable est éliminé à 3000 mètres et, remplacé par le titane, le coût de la famille métal/mousse/polymère passe de 558 à 4296 euros par mètre de canalisation. La richesse de la base de données peut alors être mise en cause et il pourrait être utile de reprendre l'analyse avec une base complétée.

2- Les solutions dites standard, appartenant à la famille métal/mousse polymère/métal, sont loin de se positionner en première position. Elles évoluent entre 991 et 2844 euros par mètre selon la profondeur tandis que la solution la plus performante se situe entre 558 et 2075 euros par mètres. Or on a déjà souligné le fait que l'acier standard a été éliminé de la sélection au profit de métaux plus onéreux tel que l'acier inoxydable. On avait alors conclu qu'on pouvait envisager d'augmenter le nombre de couche afin de voir émerger des solutions alternatives.

3- A 3000 mètres, la famille composite/mousse polymère/métal fait partie des solutions les plus performantes. Il s'agit là d'un constat intéressant car les solutions composites sont généralement considérées comme étant plus chères (voire beaucoup plus chères) que les solutions traditionnelles. Ce résultat apporte encore une justification aux études menées sur le sujet au cours des trois dernières décennies.

4- Si on s'attarde sur l'évolution des coûts en fonction de la profondeur, on constate une hausse d'un facteur 4 environ entre 2000 et 3000 mètres. L'augmentation significative des coûts vient confirmer l'existence d'une frontière entre l'offshore profond et l'offshore ultra profond. Il pourra être nécessaire d'investir des moyens techniques et économiques relativement conséquents si l'on cherche à extraire ces nouvelles ressources.

Le panel des multimatériaux envisageables est très large puisque toutes profondeurs confondues, le coût des solutions évolue entre 558 et 8961 euros par mètre de canalisation. Il est donc raisonnable de chercher à écarter les solutions « trop » coûteuses en se basant sur les ordres de grandeur des coûts de canalisations installées. Un tel critère est difficilement accessible et parfois sujet à discussion, mais on peut dire que de façon générale, le coût de certaines solutions proposées ici est largement rédhibitoire. Les ordres de grandeurs pour le coût matière dont nous disposons permettent d'écarter les solutions dont le coût est supérieur à 3000 euros par mètre de canalisation.

La figure et le tableau suivant donnent quelques détails de cette opération de post-filtrage. On constate que le seuil de 3000 euros, au-dessus duquel on écarte les solutions, est acceptable dans la mesure où on conserve « suffisamment » de solutions envisageables.

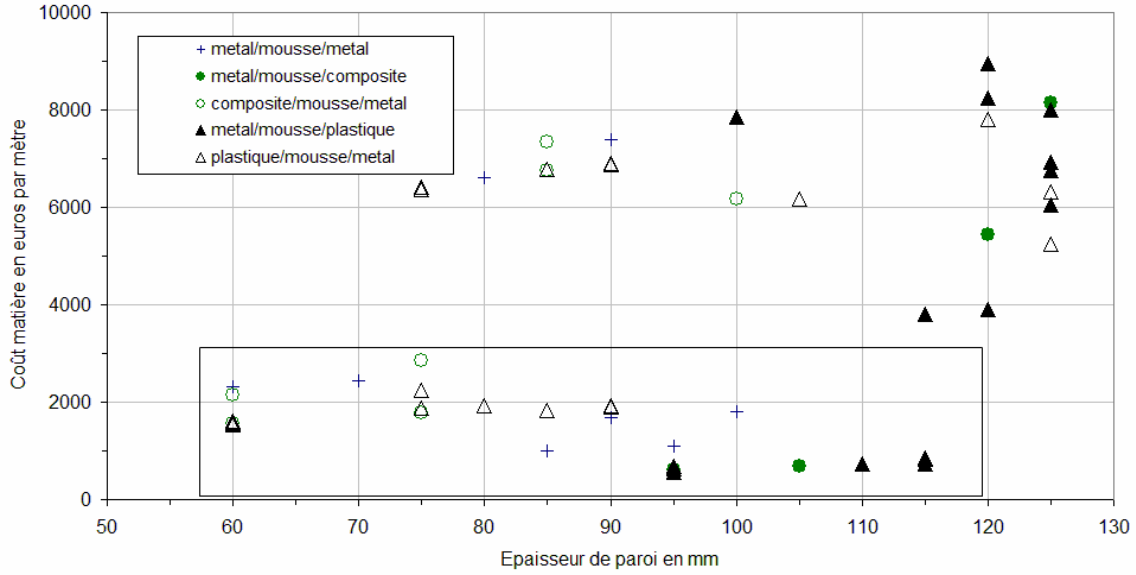


Figure 4-18 : Solution au problème pour le multimatériau à 2000 mètres de profondeur

La Figure 4-18 présente l'ensemble des résultats obtenus à 2000 mètres. On constate que l'application du critère offre un moyen de limiter le nombre de solutions tout en conservant tous les types de familles de multimatériaux. En effet, il est prudent de conserver un nombre suffisant de solutions potentielles car la recherche de moyens de mise en œuvre, la conception des embouts et la recherche d'un moyen de pose pourraient encore éliminer de nombreuses solutions. Par cette représentation, on constate que le seuil choisi semble raisonnable car la majorité des solutions éliminées se situent au-delà de la barre des 6000 euros/m.

Tableau 4-22 : Répartition des solutions en fonction du coût et de la profondeur

	Profondeur (en mètres)	2000	2500	3000	2000	2500	3000
		Inférieur à 3000 euros			*3000 euros et plus*		
01	Métal / Mousse polymère / Métal	6	6	1	2	2	3
02	Métal / Mousse polymère / Composite	2	1	0	2	2	2
03	Composite / Mousse polymère / Métal	4	4	4	4	4	4
04	Métal / Mousse polymère / Polymère	10	5	0	10	10	10
05	Polymère / Mousse polymère / Métal	12	12	12	12	12	12
	Total	34	28	17	30	30	31

Le Tableau 4-22 rappelle que l'augmentation de la profondeur de pose conduit à une réduction progressive du nombre de solutions. En appliquant le même critère sur le coût (3000

euro/m) quelle que soit la profondeur, on passe de 34 solutions pour 2000 mètres de profondeur à 17 solutions pour 3000 mètres. Par contre, on constate que toutes les familles de multimatériaux ne sont pas présentes à la profondeur de 3000 mètres, en particulier, c'est le cas pour les familles métal/mousse/composite et métal/mousse/polymère qui disparaissent de la sélection.

4.4.4.5 Bilan

En conclusion on peut dire que les solutions retenues par la méthode de sélection proposée au chapitre 3 sont conformes à nos attentes : on tend vers des solutions proches de concepts présents dans l'industrie. De plus, cette méthode permet de confirmer que certaines combinaisons de matériaux déjà envisagées pour améliorer les performances des canalisations sous-marines, et en particulier les matériaux composites peuvent avoir un rôle important à jouer dans ces avancées technologiques. Elle permet enfin d'élargir le champ d'investigation à des solutions originales qui, à notre connaissance, n'ont pas encore été étudiées.

Cette méthode a permis de sélectionner des multimatériaux qui répondent aux fonctions retenues dans le cahier des charges fonctionnel. On peut également rappeler que cette méthode ne peut être exploitée que si un choix a priori de l'architecture du multimatériau a été réalisé.

Nous disposons d'un grand nombre de solutions potentielles. C'est un point de départ pour des études plus approfondies des moyens de fabrication de ces multimatériaux et également des moyens de construction de la canalisation. Ce dernier point est extrêmement important car nous avons très peu évoqué les moyens d'installation offshore des canalisations. Il faudra par la suite envisager la conception globale de l'objet : c'est-à-dire non seulement le multimatériau constituant la paroi mais également les extrémités de la canalisation. L'intérêt de la méthode est donc de proposer une liste de solutions restreinte pour ensuite envisager l'étude du cycle fabrication-construction de la canalisation.

5 SYNTHESE GENERALE ET PERSPECTIVES

Le 2 août 2007, au cours de l'expédition Arctique-2007, les russes ont prouvé leur maîtrise des technologies sous-marines dans la zone arctique en prospectant à 4261 mètres de profondeur. Avant cet épisode remarquable, la société Total avait fait réaliser l'ensemble des dispositifs pour exploiter le champ de Girassol situé par 1400 mètres de fond à 150 km au large des côtes de l'Angola. La première huile fut produite en décembre 2001. Un record en son temps. Le monde de l'industrie pétrolière et gazière lance des défis quotidiens pour opérer des champs d'hydrocarbures situés toujours plus profondément, toujours plus loin. Dans les cinq à dix ans, l'offshore ultra profond (entre 2000 et 3000 mètres) devrait être une réalité industrielle. Pour accompagner ces développements, il est nécessaire de repenser certains principes technologiques désormais inapplicables avec l'augmentation de la profondeur. En particulier, les canalisations sous-marines sont aujourd'hui presque exclusivement construites avec de l'acier au carbone. Le choix de matériau de construction est un des enjeux de cette course à la performance. Dans ce contexte, notre étude consistait à produire une réflexion autour des méthodes de conception de canalisation sous-marine. Nous nous sommes efforcés de contribuer au développement d'une démarche permettant, à partir du cahier des charges fonctionnel d'une canalisation, de choisir objectivement un matériau ou une combinaison de matériaux acceptable.

A partir des principes de l'ingénierie simultanée, nous avons montré que l'analyse fonctionnelle était un outil indispensable pour initier un processus de conception rigoureux. En effet, l'analyse du cycle de vie du produit donne une vue d'ensemble des attendus du produit et permet ensuite d'établir un cahier des charges fonctionnel. L'examen des différentes étapes du cycle de conception nous conduit à focaliser nos travaux sur l'étape préliminaire de la conception. Le principal objectif de cette étape consiste à caractériser plus précisément l'objet de la conception. Il faut en particulier effectuer des choix de matériaux et de procédés de mise en œuvre.

Nous avons ensuite présenté les stratégies de sélection de matériaux et évalué celle qui correspondait le mieux à notre problème de conception. Le résultat de cette analyse montre qu'une stratégie à requêtes ouvertes possède les qualités suffisantes pour mener à bien nos travaux car elle offre une grande ouverture sur le choix de matériaux.

Avant de proposer une nouvelle méthode de conception, il était nécessaire de vérifier si les méthodes existantes ne pouvaient pas être appliquées. En puisant dans la littérature des outils basés sur la stratégie à requêtes ouvertes, nous avons pu établir que les méthodes de conception étudiées ne sont pas applicables dans notre cas. En effet, elles amènent à une impasse lorsque l'on est dans l'incapacité de dégager des solutions monolithiques. Néanmoins, nous avons pu

retenir qu'un support d'aide à la conception préliminaire doit permettre de traduire le cahier des charges fonctionnel et proposer un modèle de représentation et une procédure de définition du produit en menant à la sélection des solutions optimales. Pour réaliser ces choix, le système d'aide à la conception s'appuie sur une base de données hiérarchisée qui, dans notre cas, sera une base de données matériaux contenant des individus des principales classes.

Partant de ce constat, nous nous sommes tournés vers les méthodes de conception de multimatériaux dans le but d'en appliquer certains principes de base. Après le rappel de quelques définitions, nous avons pu constater que les multimatériaux regroupaient un ensemble de configurations extrêmement vaste. La variété d'architectures, de constituants et de modes de combinaisons conduit ainsi à des matériaux aussi différents que les composites fibreux, les bétons ou encore les matériaux sandwich. L'étendue des possibilités est large ce qui rend délicate la procédure de conception d'une part, et nécessite le développement de méthodes dédiées à un type précis de multimatériaux d'autre part. Nous retenons en particulier de la présentation de ces méthodes de conception de multimatériaux que l'une des principales difficultés provient de la nature combinatoire de ce type de problème.

Suite à cette étude préliminaire de l'activité de conception et des méthodes de sélection de matériaux, nous avons proposé une nouvelle méthode de conception de multimatériau. Cette méthode devra en particulier être applicable à la résolution des problèmes de conception de canalisations sous-marines.

A partir des principes identifiés dans l'étude bibliographique, la démarche de conception doit permettre de chercher en premier lieu s'il existe des solutions monolithiques au problème. Pour réaliser cette étape, nous avons choisi la méthode de sélection d'Ashby qui offre un ensemble de définitions et de principes que nous souhaitions réutiliser dans notre proposition. Outre le fait de profiter d'une méthode indispensable au déroulement de la première phase de la proposition, il sera plus aisé de créer un lien terminologique avec les étapes suivantes. Cette méthode de sélection de matériau (monolithique) repose sur l'exploitation de bases de données. Après formalisation et traduction du cahier des charges, le schéma de résolution pour un matériau monolithique se déroule en trois phases dites de filtrage, classification et documentation. On verra plus loin que le concepteur doit porter une attention particulière sur la phase de filtrage.

Le développement d'une méthode de conception doit reposer sur un modèle de représentation de l'objet à concevoir. A ce stade, nous avons émis un certain nombre d'hypothèses sur le principe de solution et sur les paramètres d'identification du multimatériau. Nous sommes arrivés à la conclusion que le modèle de représentation est un tube dont la paroi est constituée d'un multicouche de constituants indéterminés. Pour sélectionner les

multimatériaux, il faut évaluer la performance des solutions et des modèles de dimensionnement sont nécessaires. L'étude se déroulant à une étape préliminaire, il est nécessaire de dégager des tendances. Dès lors nous préconisons l'utilisation de modèles relativement simples.

Ces analyses du problème et des enjeux de l'étape préliminaire de conception ont permis de dresser un cadre méthodologique pour la démarche. Notre démarche reposera sur une évaluation systématique et objective des combinaisons de matériaux envisageables. La méthode de conception devient une méthode de sélection des constituants des multimatériaux multicouches à architecture donnée puis de dimensionnement de chacune des couches pour évaluer la performance des solutions admissibles.

Pour maîtriser le caractère combinatoire du problème, cette démarche applique massivement le principe de filtrage extrait de la méthode d'Ashby. On cherche en fait à réduire l'espace de solutions potentielles afin d'éliminer au maximum les solutions non viables. La proposition de cette nouvelle méthode de conception repose sur quatre phases clefs :

- le filtrage préliminaire de la base de données matériaux,
- l'identification des constituants du multimatériau,
- le filtrage des combinaisons admissibles,
- l'optimisation des épaisseurs et le classement des solutions.

Pour favoriser l'utilisation pratique de la démarche proposée, une étude des outils de résolution a été menée. Partant d'un problème de conception relativement simple, assimilable à un cas d'école, nous avons mis en place une méthode de résolution intuitive. La tentative de généralisation à des problèmes concrets, plus proches de la réalité industrielle a montré les limites de cette méthode de résolution. Ces limites sont liées au caractère multiastreinte de la conception et au traitement des données qui est particulièrement lourd notamment lorsque l'on augmente le nombre de couches. Dès lors, la résolution du problème nécessitait une autre approche. La technique de programmation par satisfaction de contraintes, déjà utilisée dans la résolution de problèmes de conception, a été appliquée avec succès sur le cas d'école et nous avons décidé de poursuivre dans cette voie.

La dernière partie de ces travaux a porté sur la validation de la méthode proposée en l'appliquant sur le problème de conception de canalisations sous-marines pour le transport d'hydrocarbures. Partant de l'analyse fonctionnelle, nous avons focalisé sur une application particulière de ligne de production hautement isolée. La résolution du problème a montré la pertinence de la méthode proposée : partant du cahier des charges fonctionnel, d'une base de données de matériaux, d'une géométrie cylindrique et du choix d'architecture multicouche, il est possible de proposer directement un ensemble de solutions multimatériaux qui satisfont les

critères de conception. Cet ensemble admet des solutions conceptuelles qui s'approchent de solutions utilisées aujourd'hui dans l'industrie. On trouve également une correspondance avec les propositions étudiées ces trente dernières années mais aussi des voies qui n'ont pas encore été explorées. Il serait toutefois intéressant de poursuivre l'étude en autorisant un nombre de couche supérieur.

La méthode de conception proposée a été validée sur un problème de conception industriel réaliste car elle permet de dégager des solutions qui semblent convenables. Au-delà de cette confirmation, il faut souligner le rôle central des différentes étapes de filtrages. Elles permettent de sélectionner successivement les constituants, les combinaisons de constituants et enfin les multimatériaux acceptables. En effet, sur le plan de la méthode, les étapes amont et aval aux étapes filtrages ne posent pas de difficultés majeures. En amont, la formalisation du besoin repose sur la qualité de l'analyse fonctionnelle et en aval, le concepteur peut utiliser des techniques d'optimisations relativement courantes. La formalisation des différentes étapes de filtrage est donc un apport essentiel de ce travail.

La question de la généralisation de l'approche à d'autres architectures doit être soulevée. En fait, le choix de l'architecture est une donnée d'entrée du problème de conception. C'est un paramètre qui doit être fixé avec soin par le concepteur car selon le type d'architecture choisi, le comportement du multimatériau peut être très différent. A ce titre, on n'entrevoit pas de difficulté méthodologique majeure à orienter l'architecture vers un choix différent de celui proposé dans l'exemple traité. Le choix de l'architecture multicouche pourrait être remis en cause pour un autre problème de conception et les étapes de filtrage proposées ici pourraient être encore suivies.

La méthode proposée doit être considérée comme le premier volet de la phase de conception préliminaire. En effet, on aboutit à un ensemble de solutions conceptuelles satisfaisantes au sens du cahier des charges. Pour évaluer la pertinence des solutions proposées, certaines études complémentaires doivent être menées, et en particulier la conception des extrémités de la canalisation et l'évaluation des méthodes de fabrication et de construction.

Pour l'heure, les données liées à la fabrication n'ont pas été prises en compte. On peut suggérer de compléter cette méthode par une base de données incluant des paramètres de mise en œuvre des matériaux. On imagine aussi qu'une matrice de compatibilité entre les matériaux serait un outil intéressant car elle permettrait d'optimiser la méthode de résolution en restreignant encore l'espace de solutions admissibles. Enfin, la géométrie cylindrique est un paramètre fixé dès les premières étapes. Une ouverture plus large consisterait à rechercher un outil qui permette de sélectionner les constituants d'un multicouche de géométrie quelconque.

6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[AME01] **Amen, R., Vomacka, P., (2001).** Case-based reasoning as a tool for materials selection. Materials and Design, 22, 353-358.

[API99] **API RP 1111, (1999).** Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipeline (Limit state design). - 3rd edition.

[ASH93] **Ashby, M. F., (1992).** Criteria for selecting the components of composites. Acta materialia 41, No. 5, 1313-1335

[ASH99] **Ashby, M. F., (1999).** Materials selection in mechanical design. 2nd edition. Butterworth Heinemann.

[ASH01] **Ashby, M. F., Bréchet, Y., Salvo, L., (2001).** Sélection des matériaux et des procédés de mise en œuvre. Traité des matériaux. Presses polytechniques et universitaires romandes.

[ASH03] **Ashby, M. F., Bréchet, Y., (2003).** Designing hybrid materials. Acta materialia 51, 5801-5821

[ASH04] **Ashby, M. F., Bréchet Y., Cebon D., Salvo L., (2004).** Selection strategies for materials and processes. Materials and Design, 51-67

[BEN00] **Bensana, E., Mulyanto, T., (2000)**. A Generic Approach for Conceptual Design Based on Object-oriented and Constraint Logic Programming. 4th International Conference on Engineering Design and Automation, Orlando, Florida

[BEU06] **Beunier, M., Pionetti, F.-R., Gourdoux, E., Lachheb, K., (2006).** Qualification of the Inconel Field Joint for J-Lay installation of plastic lined flowlines. Deep Offshore Technology Conference. November 28-30, Houston, Texas.

[BØT02] **Bøtker, S., Johannessen T.B., (2002).** Composite Risers and tethers : the future for deepwater TLPs. Proceedings of Offshore Technologie Conference. may 6-9 Houston, Texas

[BOU07] **Bouchonneau, N., (2007).** Etude du comportement des systèmes d'isolation thermique pour les grandes profondeurs d'eau. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté.

[BRE01] **Bréchet, Y., Bassetti, D., Landru, D., Salvo, L., (2001).** Challenges in materials and process selection. Progress in Materials Science, 407-428

[BRE00] **Bretesch (de La), B.,** (2000). La méthode APTE : analyse de la valeur, analyse fonctionnelle, Edition Pétrelle

[BRI05] **BRISES (2005).** Banque de Ressources Interactive en Sciences Economiques et Sociales, http://brises.org

[BRO93] **Brown, D.C., (1993).** Intelligent Computer Aided Design. Invited article for the Encyclopedia of Computer Science and Technology, Volume 28, (Eds.) A.Kent & J.G.Williams, Marcel Dekker, Inc.

[BRY88] **Bryan, G.H., (1888).** Application of the energy test to the collapse of a long thin pipe

under external pressure. Proceeding of the Cambridge Philosophical Society, Vol.6, 287-292

[CAS04] **Castillo, G., (2004).** Contribution méthodologique à la conception des multimatériaux : application à la définition d'un multimatériau de bâti de machine outil. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux.

[CES06] **CES Selector Version 4.6.1 Copyright © Granta Design Limited**

[CHE06] **Cheadle, A. M., Harvey, W., Sadler A. J., Schimpf, J., Shen K., Wallace M. G., (2006).** ECLiPSe : A tutorial introduction. © 2003-2006 Cisco System, Inc.

[DEC98] **Decreuse, C., et al. (1998)**, Ingénierie simultanée. Technique de l'ingénieur A 5310. 1-14

[DEN02] **Deneux, D., (2002).** Méthodes et modèles pour la conception concourante. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches de l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.

[DEN07] **Deng, Y.-M., Edwards K.L., (2007).** The role of material identification and selection in engineering design. Materials and Design 28, 131-139

[DEO99] **Deocon, J., Salvo, L., Lemoine, P., Landru, D., Bréchet, Y., Leriche, R.., (1999).** Optimum design of metal foam in sandwich structures using genetic algorithm, Proceedings of Int. Conf on Metal Foams and Porous Metal structures

[DIG03] **DIGITIP, (2003).** Excellence en conception des industries françaises. Rapport de la Direction Générale de l'Industrie des Technologies de l'Information et des Postes.

[DNV88] **DNV-RP-E305**, On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines, October 1988

[DNV03] **DNV-RP-F202**, Composite Risers, May 2003

[DNV07] **DNV-OS-F102**, Submarine Pipeline Systems, May 2003

[DUR89] **Durruvu, S., et al., (1989).** Knowledge based systems applications in engineering design : research at MIT. AI Magazine, 10(3), 79-96.

[FAL90] **Faltinsen, O.M., (1990).** Sea loads on Ships and offshore structures, Norwegian Institute of technology, Cambridge Press University

[FOR04] **Forrest, J., (2004).** Relation conception/innovation : les économistes n'ont rien à dire ? Magazine Design Management, N°6, Centre du Design Rhône-Alpes

[FOR97] **Forrest, J., et al., (1997).** Innovation et conception : pourquoi une approche en terme de processus ? Deuxième congrès international franco québécois de génie industriel, Albi, France

[FRO94] **Fron, A., (1994).** Programmation par contraintes. Editions Addison Wesley France.

[GAY05] **Gay, D. (2005).** Matériaux composites : 5e édition révisée. Hermès Sciences Publications.

[GES05] **Gestion du cycle de vie d'un produit (2005).** Encyclopédie libre. site : en.wikipedia.org/wiki/Concurrent_engineering

[GIA96] **Giard, V., et al., (1996).** Gestion et management de projet. Encyclopédie de gestion d'Economica. p. 24

[GIU05] **Giudice, F., La Rosa, G., Risitano, A., (2005).** Materials selection in the Life-Cycle Design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice. Materials and Design, 26, 9–20

[GRO01] **Groves, S., Goorich K., (2001).** Plastic lined pipe for Oil and Gas service : the Corel Project. In the proceedings of plastic pipes XI, 3-6 september, Munich, Germany.

[GUE02] **Guesnon, J., Gaillard, Ch., Richard, F., (2002).** Ultra Deep Water Drilling Riser Design and Relative Technology. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 57, No. 1, 39-57

[GUI07] **Guibiers, G., Wautelet, M., (2007).** Materials selection for micro-electromechanical systems. Materials and Design, 28, 246–248

[GUP03] **Gupta, S. K., et al., (2003).** A system for generating process and material advice during embodiment design of mechanical components. Journal of Manufacturing Systems, 22(1), 28-45

[GUI00] **Guillemot, J-M., Grunevald, Y-H., (2000).** Les composites dans l'industrie ferroviaire. Techniques de l'Ingénieur, AM 5650 1-14.

[HAS70] **Hashin, Z., (1970).** Theory on fiber reinforced Materials. National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 691 pages.

[HAT05] **Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., (2005)**, « Activité de conception, organisation de l'entreprise et innovation », in Minguet G. and Thuderoz C. (eds.), « Travail, entreprise et société. Manuel de sociologie pour ingénieurs et scientifiques », Paris, PUF.

[HUY02] **Huybrechts, D.G., (2002)**. Composite riser lifetime prediction. Proceedings of Offshore Technologie Conference. Houston, Texas, may 6-9

[JOH99] **Johnson D. B., (1999).** Rigid composite risers for deepwater oil production. Proceedings of the Intertech Second International Conference on the Global Outlook for Carbon Fiber '99. San Diego, California, November 8-10

[JOH02] **Johnson D. B., Baldwin, D. D., Long J. R., (2002).** Mechanical performance of composite production risers. Proceedings of Offshore Technologie Conference. Houston, Texas, may 3-6

[KRO02] **Kromm, F. X., (2002).** 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. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux.

[KRO06] **Kromm, F.X., Quenisset J.M., Lorriot, T., Harry, R., Wargnier, H., (2006).** Definition of a multimaterials design method. Materials and design. Article in press

[LAS02] **Last, S., Groves, S., Rigaud, J., Taravel, C., Wedel-Heinen, J., Clements, R., Buchner, S., (2002).** Comparison of models to predict the annulus conditions of flexible pipe. Offshore Technology Conference. OTC 14065. Houston, Texas, May 6-9

[LIA03] **Liao, S-h., (2003).** Knowledge management technologies and applications—litterature

review from 1995 to 2002. Expert Systems with Applications, 25, 155-164.

[LOV97] **Loverich J.S., (1997)**. Life prediction of composite armor in an unbonded flexible pipe. Thesis Master Science in Engineering Mechanics. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, April 29

[MAR04] **Marcy, J.J., et al., (2004).** Material choices for Mars. Journal of meterials engineering and performances. Vol. 13 (2), 208-217.

[MAU07] **Mauries, B., Pionetti, F.-R., Ardavanis, K., Gourdoux, E., Lachheb, K., (2007).** Latest developments in plastic lined flowlines for deepwater field developpements. Offshore Mediterranean Conference 2007. May 28-30, Ravenna, Italy.

[MAI07] **Mai, S.P., Fleck, N.A., Lu, T.J., (2007).** Optimal design of box-section sandwich beams in three point bending. International Journal of Solids and Structures 44, 4742-4769.

[MEJ01] **Mejasson P., Petridis M., Knight B., Soper A., Norman P. (2001).** Intelligent design assistant IDA : a case base reasoning system for material and design. Materials and Design, 22, 163-170

[MEL00] **Melve, B., Meland, T., Bergh, P.A., Kløvfjell, K., (2000).** Continious composite lines for methanol injection on the Asgard field – experiences from production and installation. Proceedings of ETCE/OMAE Joint Conference Energy of the New Millenium. New Orleans, LA, February 14-17

[MON08] **Monroy Aceves, C., Skordos, A. A., Sutcliffe, M. P. F., (2008).** Design selection methodology for composite structures, Material and design, 29, 2, 418-426.

[MIN00] **Min, K.T., De Charentenay, F.X., (1986).** Optimum weight design of sandwich cylinders with orthotropic facings and core under combined loads. Computers and Structures, Vol. 24, No.2, p. 313-322.

[MUL00] **Mulyanto, T., (2000).** Conception, configuration et incertitudes dans le cadre de la programmation par contraintes. RJCIA-2000, Lyon 10-13 septembre.

[MUL01] **Mulyanto, T., (2001).** Utilisation des Techniques de Programmation par Contraintes pour la Conception d'Avions. 2èmes Congrès des Doctorants de l'Ecole Doctorale Systèmes, Toulouse.

[ODR02] **Odru, P., et. Al., (2002).** Technical and economical evaluation of composite riser system. Proceedings of Offshore Technologie Conference.

[OMA99] **Omar, A.F., Karayka, M., Murray, J.J., (1999).** A comparative study of the performance of top tensionned composite and steel risers under vortex induced loading. Proceedings of Offshore Technologie Conference. Houston, Texas, May 3-6

[OST96] **Ostwald, M., (1996).** Multicriteria optimization of sandwich cylindrical shells under combined loads. Structural and multidisciplinary optimization. Springer Berlin Ed. Vol.12, No. 2-3, p. 159-166

[OUD03] **Van Oudenhove (2003).** Configuration, CSP et Bases de connaissances. Mémoire de

[PET68] **Peterson, J-P., Weingarten, V-I., Seide, P., (1968).** Buckling of thin-walled circular cylinders, NASA SP-8007, Space Vehicule Design Criteria, Sept. 1965 Revised Aug. 1968.

[PIC07] **Picard D., Hudson, W., Bouquier, L., Dupupet, G., Zivanovic, I., (2007).** Composite carbon thermoplastic tubes for deepwater applications. Proceedings of Offshore Technologie Conference. Houston, Texas, 30 April – 3 May

[SAL99] **Salama, M.M., Murali, J., Baldwin, D., Jahnsen, O., Meland, T., (1999).** Design Consideration for Composite Drilling Riser. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 3–6 May

[SAL01] **Salama, M.M., Martinussen, E., Spencer, B., Hanna, S., Hsu, T.M., Stjern, G., Franco, E., Storhaug, T., Echtermeyer, A., (2001).** Composite Risers Are Ready for Field Applications – Status of Technology, Field. Demonstration and Life Cycle Economics. 13th International Deep Offshore Technology Conference. October 17-19, Rio de Janeiro, Brazil

[SCA04] **Scaravetti, D., (2004).** Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire. Thèse de doctorat de l'ENSAM, centre de Bordeaux.

[SPA84] **Sparks, C.P., (1984).** The influence of tension, pressure and weight on pipe and piser deformations and stresses. Journal of Energy resources technology, Vol. 106

[SPA86] **Sparks, C.P., (1986).** Lightweight composite production risers for a deep water tension leg platform. Proceedings of the Fifth International Symposium OMAE. Tokyo. Japan

[SPA88] **Sparks, C.P., Odru, P., (1988).** Mechanical testing of high performance composite tubes for TLP risers. OTC May 2-5, Houston

[STE04] **Steeves C.A., Fleck N.A., (2004).** Material selection in sandwich beam construction. Scripta Materialia, 50, 1335-1339.

[TOR00] **Torquato, S., (2000).** Modeling of physical properties of composite materials. International Journal of Solids and Structures 37, 411-422.

[TIM61] **Timoshenko, S.P., (1961).** Théorie de la stabilité élastique. Deuxième edition. Dunod. Paris. 1961

[TSA80] **Tsai, S., (1980).** An introduction to composite material. CRC Press, 457 pages

[VAD95] **Vadvard, P., (1995).** Méthodologie de conception de produit, l'évolution des représentations du produit. Actes du séminaire Confere – Technologies et outils de représentation du concepteur, ENSAM Paris, Avril.

[VAR05] **Vareilles, E., (2005).** Conception et approches par propagation de contraintes : contribution à la mise en œuvre d'un outil d'aide interactif. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse.

[VER04] **Vernat, Y., (2004).** Formalisation et qualification de modèles par contraintes en

conception préliminaire. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers.

[VIN99] **Vinson, J-R., (1999).** The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials, CRC Presse, 378 pages.

[VIZ01] **Vizzini, A.J., (2001).** Design, Tooling, and Manufacturing Interaction, ASM Handbook, Volume 21: Composites, ASM International, Materials Park, OH, 2001, pp. 373-383.

[WIL00] **Williams, J.G., Sas-Jaworsky II, A., (2000).** Composite spoolable pipe development, advancements and limitations. Proceedings of Offshore Technologie Conference. Houston, Texas, 1-4 May 2000

[XIA00] **Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K., (2000).** Optimal design of a thick-walled sandwich pipe. Advanced Composite Materials, Vol. 9, No. 4, p. 349-361.

[YAN01] **Yannou, B., (2001).** Préconception de produit. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches de l'INPG.

[ZEN95] **Zenkert, D., (1995).** An introduction to sandwich construction. Engineering Materials Advisory Service, 277 pages.

[ZRE90] **Zreik, K. (1990).** Sur la créativité assistée par ordinateur. Dans *Sur la modélisation des processus de conception créative, 01 DESIGN'90*, page 21. Octobre 1990. EUROPIA.

7 ANNEXES

I . Base de données matériaux

II. Programme ECLiPSe pour le cas d'école

III. Etude mécanique et thermique d'une conduite sous-marine (paroi simple)

IV. Etude mécanique et thermique d'une conduite sous-marine (paroi multimatériau)

V. Programme ECLiPSe pour le trimatériau

TABLE DES ANNEXES

I. Base de données matériaux 3

II. Programme ECLiPSe pour le cas d'école 6

III. Etude mécanique et thermique d'une conduite sous-marine (paroi simple) 8

III.1 Introduction 8

III.2 Description et analyse de la conduite en phase d'installation 8

III.2.1 Description du système étudié et notations 8

III.2.2 Analyse statique de la canalisation 11

III.2.2.1 Hypothèses 11

III.2.2.2 Bilan des forces 11

III.2.2.3 Equilibre statique 12

III.2.2.4 Conditions aux limites 14

III.2.3 Etat de contrainte dans le tube 16

III.2.3.1 Contraintes dues à la pression interne et externe 16

III.2.3.2 Contrainte longitudinale due à la tension axiale 16

III.2.3.3 Contrainte due à la flexion 17

III.2.3.4 Critère de résistance mécanique 18

III.2.4 Conditions de satisfaction des astreintes 19

III.2.4.1 Résister au poids propre en surface 19

III.2.4.2 Ne pas dépasser la tension admissible de la tour 20

III.2.4.3 Résister à la pression hydrostatique et la flexion au point de touche 21

III.2.4.4 Etre stable dans l'eau 23

III.2.4.5 Résister à la rupture par flambage 24

III.2.4.6 Respecter l'encombrement imposé par le système de serrage 24

III.3 Description et analyse de la conduite en phase de service 25

III.3.1 Etude mécanique de la conduite 25

III.3.1.1 Analyse du tube sous pression interne et externe 25

III.3.1.2 Condition de satisfaction de l'astreinte de résistance aux pressions en service 26

III.3.2 Etude thermique de la conduite 26

III.3.2.1 Définition du coefficient d'échange global 26

III.3.2.2 Estimation du besoin en isolation thermique 28

III.3.2.3 Condition de satisfaction de l'astreinte relative aux pertes thermiques 29

IV. Etude mécanique et thermique d'une conduite sous-marine (paroi multimatériau) 30

IV.1 Introduction 30

IV.2 Hypothèses et démarche 30

IV.3 Caractéristiques du tube multicouche et notations 33

IV.4 Conditions de satisfaction des astreintes en installation 35

IV.4.1 Résister au poids propre en surface 35
IV.4.2 Ne pas dépasser la tension admissible de la tour 36
IV.4.3 Résister à la flexion et la pression hydrostatique au point de touche 36
IV.4.4 Etre stable dans l'eau 39
IV.4.5 Résister à la rupture par flambage 40
IV.4.6 Respecter l'encombrement imposé par le système de serrage 41

IV.5 Conditions de satisfaction des astreintes en service 41
IV.5.1 Résister à la pression interne et externe 41
IV.5.2 Limiter les pertes thermiques 42

V. Programme ECLiPSe pour le trimateriau 43

I. BASE DE DONNEES MATERIAUX

LABEL	Name	Rho g.cm-3	Limite elastique MPa	Lambda W.m-1.K-1	E GPa	Nu	Coût €.kg-1	Max Temp (K)	Min Temp (K)	Acides forts	Usure	Sea Water
101	Aluminas	3	69	12	215	0,21	0,8	1350	1	5	5	5
102	Aluminium Nitrides	2,92	197	60	302	0,23	50	1300	1	3	5	5
103	Brick (Common Hard)	1,98	3	0,4	10	0,2	0,3	950	1	3	4	4
104	Concrete (Medium Density)	2,2	1	0,7	15	0,1	0,02	753	110	2	4	4
105	Granites	2,59	16	1,7	51	0,24	0,5	600	1	2	5	4
106	Silicon	2,28	165	84	140	0,265	4,4	800	1	3	4	4
107	Silicon Carbides	3	130	75	350	0,16	7	1600	1	5	5	5
108	Tungsten Carbides	15,25	335	28	600	0,2	9	1000	1	4	5	5
109	borosilicate	2,45	31,9	1,1	66,3	0,2	3,51	473	1	2	2	5
110	Silica Glasses	2,17	45	1,4	66,3	0,15	3	1170	1	5	4	5
201	Epoxy Laminate (EP) - Carbon Prepreg	1,48	520	0,4	75	0,36	85	400	150	3	3	5
202	Epoxy Laminate (EP) - Glass Prepreg	1,65	210	0,4	15	0,36	3,5	400	150	3	4	4
203	Phenolic Foam: Closed Cell (0.080)	0,08	0,35	0,03	0,32	0,27	8	390	73	3	3	5
204	Polycarbonate Foam: Rigid,Closed Cell (0.65)	0,62	12	0,09	0,95	0,28	5	385	140	5	2	5
205	Polymethacrylimide Foam: Rigid PMACR (0.071)	0,06	1,1	0,029	0,075	0,29	22	410	60	4	1	5
206	Polystyrene Foam Closed Cell (0.050)	0,047	0,8	0,033	0,025	0,25	1,2	355	1	3	1	5
207	Polyurethane Foam: Flexible, Closed Cell (0.08)	0,075	0,025	0,024	0,0003	0,28	4	345	220	1	2	5
208	Polyvinylchloride Foam: Rigid Closed Cell (0.080)	0,078	1,15	0,027	0,08	0,31	6	340	170	5	1	5
209	Bamboo, parallel to grain	0,6	35,9	0,16	15	0,32	1	390	200	1	2	3
210	Cork	0,6	7,1	0,1	1,5	0,03	2	390	200	3	3	4
211	Leather	0,81	2	0,156	0,1	0,05	1	380	190	2	5	4
212	Wood (Medium Density), parallel to grain	0,45	24,8	0,2	6	0,35	0,25	390	200	1	2	3
213	Wood (Medium Density), perpendicular to grain	0,45	2,3	0,09	0,4	0,02	0,25	390	200	1	2	3
301	Carbon steel, AISI 1015 (normalised)	7,8	300	50	205	0,285	0,25	617	205	2	5	3
302	Carbon steel, AISI 1030 (normalised)	7,8	310	50	208	0,285	0,25	604	210	2	5	3
303	Carbon steel, AISI 1080 (normalised)	7,8	470	48	200	0,285	0,25	559	230	5	3	3
304	Cast austenitic stainless steel (ASTM CG-8M)	7,7	290	14	189	0,265	1,6	1020	1	4	4	5
305	Grey (Flake graphite) cast iron (BS grade 100)	6,9	65	50	80	0,255	0,1	623	123	3	5	3

LABEL	Name	Rho g.cm-3	Limite elastique MPa	Lambda W.m-1.K-1	E GPa	Nu	Coût €.kg-1	Max Temp (K)	Min Temp (K)	Acides forts	Usure	Sea Water
306	Iron, commercially pure "Ingot Iron", annealed	7,86	110	70	204	0,29	0,1	540	1	3	4	3
307	Low alloy steel, AISI 3140 (normalised)	7,8	540	45	201	0,285	0,25	886	205	3	4	3
308	Antimonial Lead Alloys	9,7	10	22	13	0,435	0,45	293	1	2	3	5
309	Cast aluminium alloy (A332.0) (a)	2,7	200	112	71	0,32	0,91	410	1	4	4	4
310	Cast magnesium alloy (AM20)	1,8	100	59	40	0,3	2,2	420	1	2	3	2
311	Near-alpha titanium alloy (6-2-4-2) (a)	4,53	828	5,9	109	0,35	35	800	1	4	4	5
312	Nickel Beryllium Casting Alloy CR-1, as cast	7,9	430	28	172	0,29	10	730	1	2	5	5
313	Tungsten-10%Copper alloy, "Elkonite 50W3"	17,1	430	80	270	0,27	8	1010	1	3	4	4
314	Zinc-Aluminium General Casting Alloy, ZA-12	5,98	205	113	81	0,296	0,8	363	253	2	4	3
315	Zinc-Copper-Titanium Pressure Die-Casting Alloy,	7,05	130	95	95	0,23	0,6	353	253	2	4	4
401	Butyl Rubber, unfilled	0,9	2	0,08	0,001	0,499	0,6	370	222	2	5	5
402	Ethyl Vinyl Acetate (EVA) - 12% VA	0,93	18	0,3	0,07	0,47	0,8	320	150	1	3	5
403	Isoprene (IR) - unfilled	0,93	23	0,08	0,0017	0,499	0,6	370	220	1	4	5
404	Natural Rubber (NR), unfilled	0,92	28	0,1	0,0015	0,499	0,6	342	217	2	3	5
405	Polychloroprene (CR) Neoprene	1,23	3,4	0,1	0,0007	0,48	1	375	220	3	4	5
406	PolyUrethane (PU), flexible	1,02	25	0,28	0,002	0,49	2	340	200	3	4	5
407	Silicone (SIL) elastomers	1,4	5	0,2	0,003	0,46	8	500	140	5	4	5
408	Epoxies (EP), rigid	1,17	50	0,18	2,8	0,37	2,8	400	150	2	3	5
409	Phenolics (PHEN)	1,24	40	0,16	6	0,4	0,9	415	180	3	3	4
410	Polyester (PES) - casting / flexible	1,14	14	0,15	0,1	0,43	2,1	390	190	4	3	5
411	Acrylic (PMMA) - General Purpose	1,15	63	0,2	2,7	0,4	1,65	355	150	2	4	4
412	Acrylobutadienestyrene (ABS) - Medium Impact	1,04	40	0,14	2,5	0,38	1,25	358	150	3	2	5
413	Cellulose Acetate (CA)	1,26	38	0,17	1	0,35	2,7	350	250	1	3	5
414	High density Polyethylene (HDPE)	0,95	20	0,45	0,8	0,4	0,55	340	210	4	3	5
415	Ionomer (IO)	0,94	25	0,22	0,14	0,4	1,1	350	200	1	4	5
416	Nylon 11 (Polyamide, PA)	1,03	49	0,25	0,9	0,38	4,8	350	220	1	3	5
417	Poly TetraFluoro Ethylene (PTFE)	2,1	15	0,19	0,3	0,44	7,5	510	10	5	4	5
418	Polycarbonate (PC)	1,2	55	0,14	2	0,39	2,75	385	140	5	3	5
419	Polyether ether ketone (PEEK)	1,29	55	0,23	3,7	0,38	44	520	150	1	3	5
420	Polyethylene terephthalate (PET)	1,32	50	0,15	2,2	0,38	1,1	388	230	2	3	5

LABEL	Name	Rho g.cm-3	Limite elastique MPa	Lambda W.m-1.K-1	E GPa	Nu	Coût €.kg-1	Max Temp (K)	Min Temp (K)	Acides forts	Usure	Sea Water
421	Polypropylenes (PP)	0,9	20	0,12	1	0,4	0,5	370	210	5	3	5
422	Polystyrene (PS)	1,04	30	0,12	2,9	0,4	0,65	355	200	3	3	5
423	PolyUrethane TPlastic Elastomer (PU) (a)	1,02	28	0,29	0,0065	0,47	2,7	340	150	3	4	5
424	Polyvinylchloride (UPVC) - Rigid	1,35	45	0,24	2,2	0,38	0,45	330	240	4	2	5

II. PROGRAMME ECLIPSE POUR LE CAS D'ECOLE

```
%       CONCEPTION PRELIMINAIRE BI-MATERIAU
% conception d'une poutre à masse minimale
% astreintes de raideur en traction (K0), isolation thermique (UO) données
% longueur (L0) et largeur (B0) de la poutre données
% I] APPEL DES LIBRAIRIES NECESSAIRES A LA RESOLUTION DU PSC
       :- lib(ic).
       :- lib(ic_global).
% II] DEFINITION DES VARIABLES SUR LEURS DOMAINES DE VARIATION
       mat1(I1, RHO1, L1, E1) :-
       element(I, [101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 201, 202, 203, 204, 205,
206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311,
312, 313, 314, 315, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415,
416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424], I1),
       element(I, [3000, 2920, 1980, 2200, 2590, 2280, 3000, 15250, 2450, 2170, 1480, 1650,
80, 620, 60, 47, 75, 78, 600, 600, 810, 450, 450, 7800, 7800, 7800, 7700, 6900, 7860, 7800,
9700, 2700, 1800, 4530, 7900, 17100, 5980, 7050, 900, 930, 930, 920, 1230, 1020, 1400, 1170,
1240, 1140, 1150, 1040, 1260, 950, 940, 1030, 2100, 1200, 1290, 1320, 900, 1040, 1020, 1350],
RHO1),
       element(I, [12000, 60000, 400, 700, 1700, 84000, 75000, 28000, 1100, 1400, 400, 400,
30, 90, 29, 33, 24, 27, 160, 100, 156, 200, 90, 50000, 50000, 48000, 14000, 50000, 70000,
45000, 22000, 112000, 59000, 5900, 28000, 80000, 113000, 95000, 80, 300, 80, 100, 100, 280,
200, 180, 160, 150, 200, 140, 170, 450, 220, 250, 190, 140, 230, 150, 120, 120, 290, 240],
L1),
       element(I, [2609, 2643, 2302, 2343, 2465, 2566, 2658, 2712, 2491, 2491, 2504, 2343,
1958, 2067, 1813, 1703, 1270, 1819, 2343, 2112, 1842, 2251, 1980, 2604, 2606, 2602, 2596,
2510, 2604, 2602, 2328, 2498, 2441, 2541, 2587, 2632, 2511, 2527, 1381, 1806, 1434, 1422,
1345, 1450, 1491, 2175, 2251, 1842, 2171, 2163, 2072, 2050, 1875, 2061, 1951, 2141, 2203,
2151, 2072, 2178, 1568, 2151], E1).
       mat2(I2, RHO2, L2, E2) :-
       element(I, [101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 201, 202, 203, 204, 205,
206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311,
312, 313, 314, 315, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415,
416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424], I2),
       element(I, [3000, 2920, 1980, 2200, 2590, 2280, 3000, 15250, 2450, 2170, 1480, 1650,
80, 620, 60, 47, 75, 78, 600, 600, 810, 450, 450, 7800, 7800, 7800, 7700, 6900, 7860, 7800,
9700, 2700, 1800, 4530, 7900, 17100, 5980, 7050, 900, 930, 930, 920, 1230, 1020, 1400, 1170,
1240, 1140, 1150, 1040, 1260, 950, 940, 1030, 2100, 1200, 1290, 1320, 900, 1040, 1020, 1350],
RHO2),
       element(I, [12000, 60000, 400, 700, 1700, 84000, 75000, 28000, 1100, 1400, 400, 400,
30, 90, 29, 33, 24, 27, 160, 100, 156, 200, 90, 50000, 50000, 48000, 14000, 50000, 70000,
45000, 22000, 112000, 59000, 5900, 28000, 80000, 113000, 95000, 80, 300, 80, 100, 100, 280,
200, 180, 160, 150, 200, 140, 170, 450, 220, 250, 190, 140, 230, 150, 120, 120, 290, 240],
L2),
       element(I, [2609, 2643, 2302, 2343, 2465, 2566, 2658, 2712, 2491, 2491, 2504, 2343,
1958, 2067, 1813, 1703, 1270, 1819, 2343, 2112, 1842, 2251, 1980, 2604, 2606, 2602, 2596,
2510, 2604, 2602, 2328, 2498, 2441, 2541, 2587, 2632, 2511, 2527, 1381, 1806, 1434, 1422,
1345, 1450, 1491, 2175, 2251, 1842, 2171, 2163, 2072, 2050, 1875, 2061, 1951, 2141, 2203,
2151, 2072, 2178, 1568, 2151], E2).
% III] ECRITURE DU PROBLEME NOMME "BIMAT"
```

```
        bimat(I1, RHO1, L1, E1, I2, RHO2, L2, E2, V1, E, K, U, M) :-
        % III-1] Definition des variables de conception et de leur domaine de variation
                mat1(I1, RHO1, L1, E1),
                mat2(I2, RHO2, L2, E2),
                N #:: [1..100],
                V1 $= 1*N,
                L0 #= 1,
                B0 $= 0.1,
                K0 #= 10000000,
                U0 $= 3,
                EADM $= 15,
                E #:: [0..100],
        % III-2] Changement d'échelle pour les variables pour que leur domaine de variation
soit constitué d'entiers
                V11 $= V1/100,
                E11 $= exp(E1/100),
                E22 $= exp(E2/100),
        % III-3] Definition des Variables critères
                K $= (B0/L0)*(E11*V11+E22*(1-V11))*E/1000,
                U $= (1/(V11/L1+(1-V11)/L2))/E,
                M $= (RHO1*V11+RHO2*(1-V11))*L0*B0*E,
        % III-4] Ecriture des contraintes
                E $=< EADM,
                K $>= K0,
                U $=< U0.
% IV] RESOLUTION ET ECRITURE DES RESULTATS
        solve(I1, RHO1, L1, E1, I2, RHO2, L2, E2, V1, E, K, U, M):-
        bimat(I1, RHO1, L1, E1, I2, RHO2, L2, E2, V1, E, K, U, M),
        labeling([I1, RHO1, L1, E1, I2, RHO2, L2, E2, V1, E]).
        out:- open("output.txt", write, fichier),
                ( writeln(fichier, [I1, I2, V1, E, K, U, M]),
                solve(I1, RHO1, L1, E1, I2, RHO2, L2, E2, V1, E, K, U, M),
                writeln(fichier, [I1, I2, V1, E, K, U, M]),
                fail; close(fichier)).
```

III. ETUDE MECANIQUE ET THERMIQUE D'UNE CONDUITE SOUS-MARINE (PAROI SIMPLE)

III.1 Introduction

Au cours de l'analyse fonctionnelle de la canalisation, nous avons pu mettre en évidence que certaines astreintes de conception sont liées au comportement mécanique et thermique de la ligne. D'une part, lors de la phase d'installation, il est nécessaire d'estimer la contrainte axiale due à la tension, la contrainte axiale due aux efforts de pression et de flexion, la tension maximale admissible que doit supporter la tour de pose et enfin il est nécessaire d'estimer si les caractéristiques de la ligne conduisent à une structure pesante dans l'eau. D'autre part, en service, il faut concevoir la conduite de telle sorte qu'elle supporte les efforts de pression interne et externe et que la circulation du fluide à l'intérieur de la canalisation se passe dans de bonnes conditions.

Sur la base de méthodes employées par les ingénieurs de conception de canalisation sous-marines, nous présentons les hypothèses de modélisation qui offrent un moyen d'estimer les efforts extérieurs appliqués à une canalisation et qui permettent de traduire son comportement thermique.

L'étude débute par l'analyse mécanique de la conduite en fonction des différentes étapes du cycle de vie : l'installation et la phase de service. Ensuite, l'analyse du comportement thermique de la conduite en phase service permettra d'établir les conditions d'un transport fluide acceptable.

III.2 Description et analyse de la conduite en phase d'installation

III.2.1 Description du système étudié et notations

Le système étudié $\sum$ est la canalisation immergée contenant un fluide quelconque (Figure III-1). Tenue en surface par le navire de pose, elle atteint le fond de la mer au point de touche en suivant la forme de caténaire.

Le point de touche est le point de contact entre la canalisation et le sol marin. Ce point, situé à la profondeur H_o, est pris comme origine des axes (x, z). En ce point, la tangente entre la canalisation et le sol (considéré parfaitement horizontal) est égale à zéro. La tension exercée par la ligne posée au sol sur la partie de ligne en cours de pose est $\overrightarrow{T_o}$.

La position du navire de pose par rapport au point de touche est repéré par la distance horizontale (ou distance au sol) x_o.

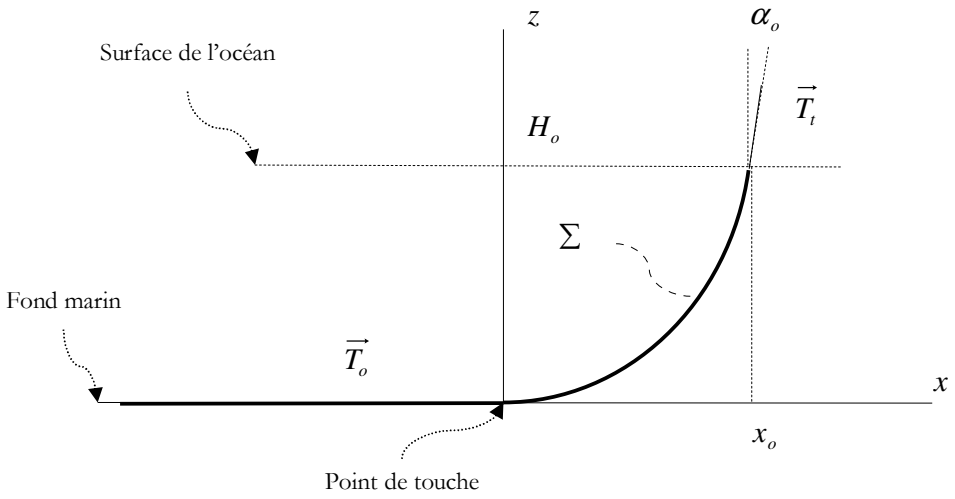


Figure III-1 : Représentation schématique du système étudié

Le navire de pose est équipé d'une tour verticale haute de 50 mètres. La tour supporte chaque nouveau tronçon devant être assemblé. Elle est munie à sa base d'un système de serrage qui maintient la canalisation immergée. En ce point, la tension exercée par la tour sur la partie de ligne immergée est notée $\vec{T}_t$. Selon les conditions de mer, on accepte que la tour s'écarte de la verticale d'un angle α_o. Cet angle (compris entre 5° et 10°) est limité afin d'éviter un rayon de courbure trop important sur la ligne en sortie de tour.

Caractéristiques du milieu marin et du fluide interne

La conduite, contenant un fluide i, est immergée dans l'eau de mer, on définit par :

ρ_e	masse volumique de l'eau de mer,
g	norme du champ gravitationnel,
$p_e(z) = \rho_e g z$	pression hydrostatique agissant à la profondeur z,
ρ_i	masse volumique du fluide contenu dans la canalisation,
$p_i(z) = \rho_i g z$	pression agissant dans la canalisation à la profondeur z,
H_o	profondeur.

Géométrie

On considère un tube d'épaisseur e et d'axe $\vec{e_z}$.

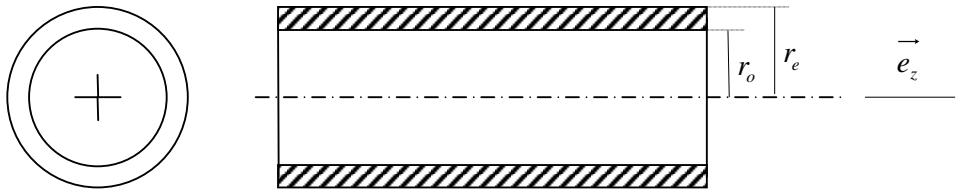


Figure III-2 : Géométrie de la conduite

Les caractéristiques du tube sont définies par :

r_o	rayon interne,
e	épaisseur totale,
$r_e = r_o + e$	rayon externe,
$D_m = 2r_o + e$	diamètre moyen,
$S_e = \pi r_e^2$	aire de la face externe de normale $\vec{e_z}$,
$S_i = \pi r_o^2$	surface interne perpendiculaire à la génératrice du tube,
$S_p = \pi e(2r_o + e)$	aire totale de la section transversale de normale $\vec{e_z}$.

Matériaux

Les propriétés matériaux sont notées :

E	module d'élasticité longitudinal,
ρ	masse volumique,
Y	limite d'élasticité,
υ	coefficient de Poisson,
λ	conductivité thermique.

Masse

Les propriétés intrinsèques du matériau et les caractéristiques géométriques donnent :

$\mu = \rho S_p$ masse linéique de la conduite.

Poids linéique

$w_{air} = \rho(S_e - S_i)g$ conduite vide dans l'air,

$w_{app,vide} = w_{air} - \rho_e S_e g$ conduite vide dans l'eau,

$w_{app,fluide[i]} = w_{air} - \rho_e S_e g + \rho_i S_i g$ conduite dans l'eau pleine d'un fluide i,

$w_{app,eau} = (\rho - \rho_e)S_p g$ conduite dans l'eau pleine d'eau.

Constantes

Le dimensionnement de la conduite nécessite la définition de coefficients :

C_c coefficient de chaînette,

C_d coefficient d'amplification dynamique,

C_r coefficient de sécurité en résistance mécanique,

C_f coefficient de sécurité en flambage.

III.2.2 Analyse statique de la canalisation

III.2.2.1 Hypothèses

Dans cette analyse préliminaire, les efforts et les déplacements d'origine hydrodynamique agissant sur la canalisation sont d'abord négligés (efforts dus aux courants, à la houle, les déplacements imposés par les mouvements du navire de pose). On considère que la canalisation ne s'allonge pas sous l'effet de son propre poids ni sous l'effet de la température. On néglige la raideur en flexion ce qui est une bonne approximation pour un tube de faible diamètre devant sa longueur.

Cette approche est utilisée en conception préliminaire de canalisation offshore. Elle conduit à limiter l'étude de la ligne à une analyse statique. Cependant, nous préciserons plus loin que les efforts hydrodynamiques peuvent être pris en compte en appliquant un coefficient d'amplification dynamique sur les efforts statiques.

III.2.2.2 Bilan des forces

On isole un élément de la canalisation, constituée de la paroi seule de longueur curviligne ds. $\overrightarrow{n_1}$ et $\overrightarrow{n_2}$ sont les normales sortantes dirigées suivant la génératrice de l'élément de tube à chacune de ses extrémités (Figure III-3).

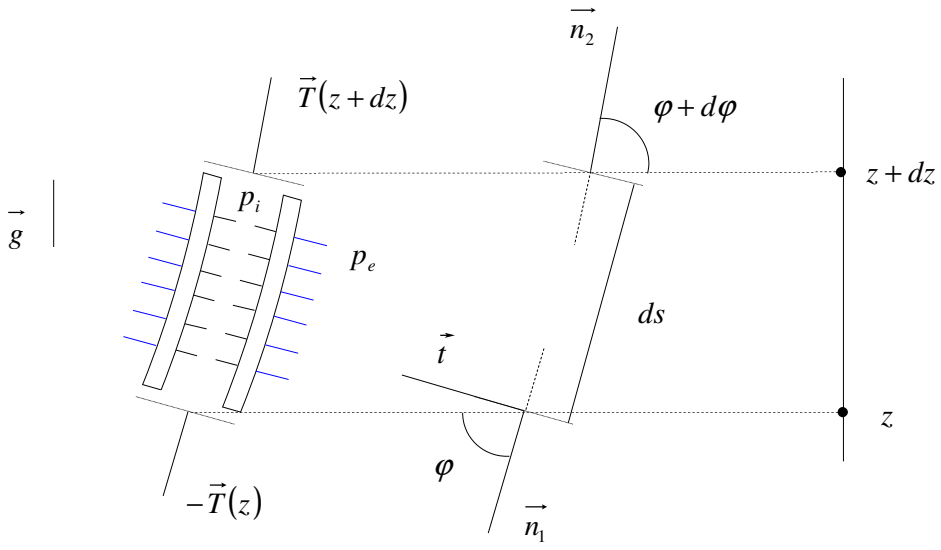


Figure III-3 : Représentation d'un élément de canalisation

Les actions mécaniques agissant sur l'élément de longueur ds sont les efforts de pression portés par les normales sortantes aux surfaces interne et externe du tube, le poids de l'élément de longueur ds appliqué au centre de gravité de la ligne et dirigé selon $\vec{g}$ et les tensions agissant sur la section transverse S_p de la paroi à chaque extrémité de l'élément. Ces tensions sont respectivement portées par les vecteurs $\vec{n_1}$ et $\vec{n_2}$ aux altitudes z et $z+dz$.

III.2.2.3 Equilibre statique

Le principe fondamental de la statique appliqué à l'élément de tube permet d'écrire :

$$-\vec{T}(z)+\vec{T}(z+dz)+d\vec{P}+\overrightarrow{F_{P_e}}+\overrightarrow{F_{P_i}}=\vec{0}$$

On exprime chacune des forces agissant sur l'élément de longueur ds. Soit Ω_e la surface externe du tube en contact avec l'eau de mer. $p_e(z)$ est la pression exercée par l'eau de mer sur cette surface et $\vec{n}$ la normale sortante à cette surface. La force de pression agissant sur la surface externe s'écrit :

$$\overrightarrow{F_{P_e}}=-\iint_{\Omega_e} p_e(z)ds\vec{n}$$

Soit Γ_e la surface totale extérieure de l'élément de tube de longueur ds, de volume

externe V_e. Elle se décompose suivant la surface Ω_e et les faces perpendiculaires à la génératrice du tube S_e situées aux altitudes z et $z+dz$.

La force de pression externe peut alors s'écrire :

$$\overrightarrow{F_{P_e}} = -\iint_{\Gamma_e} p_e(z) ds \vec{n} + \iint_{S_e} p_e(z) ds \overrightarrow{n_1} + \iint_{S_e} p_e(z+dz) ds \overrightarrow{n_2}$$

Par application du théorème de Green-Ostrogradski et en considérant que la pression $p_e(z)$ n'évolue pas sur les faces transversales S_e, cette équation devient :

$$\overrightarrow{F_{P_e}} = \iiint_{V_e} \rho_e g dV \vec{z} + p_e(z) \iint_{S_e} ds \overrightarrow{n_1} + p_e(z+dz) \iint_{S_e} ds \overrightarrow{n_2}$$

Après intégration, on obtient :

$$\overrightarrow{F_{P_e}} = \rho_e g S_e ds \vec{z} + p_e(z) S_e \overrightarrow{n_1} + p_e(z+dz) S_e \overrightarrow{n_2}$$

La force de pression due au fluide interne se décompose de façon similaire :

$$\overrightarrow{F_{P_i}} = -\rho_i g S_i ds \vec{z} - p_i(z) S_i \overrightarrow{n_1} - p_i(z+dz) S_i \overrightarrow{n_2}$$

Le poids de l'élément de tube de longueur ds est :

$$d\vec{P} = -\rho g (S_e - S_i) ds \vec{z}$$

On projette[1] l'équation d'équilibre sur les axes $\overrightarrow{n_1}$ et $\vec{t}$:

$$dT(s) + \Delta(\rho S) g z = w_{app,fluide[i]} \sin(\varphi) ds$$
$$T(s) d\varphi + \Delta(\rho S) g z d\varphi = w_{app,fluide[i]} \cos(\varphi) ds$$

avec

$$\Delta(\rho S) = \rho_e S_e - \rho_i S_i$$

Ce système d'équation, résolu par Faltinsen [FAL90], conduit à l'équation de la position d'équilibre statique de la ligne immergée suspendue au navire de pose (équation dite de la caténaire).

---

[1] Simplifications : D'une part, comme $d\varphi \approx 0$ alors $\cos(d\varphi) \approx 1$ et $\sin(d\varphi) \approx d\varphi$ et, d'autre part, les termes de second ordre sont négligés.

L'abscisse curviligne en fonction de la coordonnée x s'écrit :

$$s(x) = a \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \qquad \text{[III-1]}$$

avec $a = \dfrac{T_o}{w_{app,fluide[i]}}$

La tension dans la ligne en fonction de l'altitude z s'écrit :

$$T(z) = T_o + \left\lfloor w_{app,fluide[i]} - \Delta(\rho S) g \right\rfloor z \qquad \text{[III-2]}$$

On retrouve par identification les définitions de la tension vraie, notée T_{vraie}, et de la tension effective, notée T_{eff}, introduites par Sparks [SPA84] :

$$T_{vraie} = T_{eff} - p_e S_e + p_i S_i \qquad \text{[III-3]}$$

avec

$$T_{eff} = T_o + w_{app,fluide[i]} z$$

$$T(z) = T_{vraie}$$

Les relations suivantes découlent directement de cette analyse, elles seront utiles pour poursuivre le dimensionnement.

Tangente de la courbe caténaire :

$$\tan(\varphi) = \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \qquad \text{[III-4]}$$

Equation de la caténaire en z :

$$z = a\left[\cosh\left(\frac{x}{a}\right) - 1\right] \qquad \text{[III-5]}$$

Rayon de courbure :

$$Rc(x) = a \cosh^2\left(\frac{x}{a}\right) \qquad \text{[III-6]}$$

III.2.2.4 Conditions aux limites

Lors d'une opération d'installation, le navire doit adapter sa position par rapport au point

de touche. Dans les conditions normales de fonctionnement, la tour de pose est perpendiculaire au pont du navire. Cependant, le navire subit les mouvements imposés par la houle. On ne peut évidemment pas considérer que tous les états de mer sont acceptables pour poser une canalisation. Un des critères qui fixe les limites d'opérabilité est l'angle entre la tour de pose et le plan horizontal. La position angulaire acceptable est fixée à 6° par rapport à la verticale. Cette position permet de garantir que les efforts imposés à la canalisation et subis par le navire restent dans des limites acceptables.

Cette position angulaire moyenne est souhaitable et bien entendu, il n'est pas réaliste de penser qu'il s'agit là d'une donnée absolue. Lors d'une opération de pose, la tour s'écarte de cette position angulaire de quelques degrés. Nous verrons plus loin que l'on peut approcher l'influence de ces effets hydrodynamiques en appliquant un coefficient d'amplification dynamique.

L'expérience des opérations offshore montre que l'angle de pose permet de limiter les efforts dans la ligne. On tend alors à éviter d'imposer des efforts de flexion non désirés à la canalisation dans la zone située directement au bas de la tour. La position du navire est également un paramètre opératoire particulièrement important car elle agit directement sur la tension horizontale. Ainsi, cette tension augmente lorsque le navire impose un déplacement trop important qui déséquilibre la ligne.

Par conséquent, le navire de pose doit adapter sa position par rapport au point de touche (la distance x_o) et la position angulaire de conduite par rapport à la verticale à la sortie de la tour (l'angle α_o).

A la surface, l'angle $\alpha_o = \frac{\pi}{2} - \varphi_0$ est connu. On tire de l'équation [III-4] :

$$\left(\frac{x_o}{a}\right) = \operatorname{arcsin} h[\tan(\varphi_0)] \qquad [\text{III-7}]$$

Connaissant la profondeur H_0, on déduit de l'équation [III-5] :

$$H_0 = a\left[\cosh\left(\frac{x_o}{a}\right) - 1\right] \qquad [\text{III-8}]$$

Les équations [III-5] et [III-8] donnent une expression de a :

$$a = \frac{H_0}{\cosh[\operatorname{arcsin} h(\tan\varphi_0)] - 1} \qquad [\text{III-9}]$$

En réinjectant cette dernière expression dans l'équation [III-7], on déduit la distance

horizontale x_o :

$$x_o = a \arcsin h[\tan(\varphi_0)] \qquad [\text{III-10}]$$

Et la tension horizontale T_o est :

$$T_o = a w_{app,fluide[i]} \qquad [\text{III-11}]$$

Dès lors, on connaît la tension axiale agissant en tout point de la canalisation.

III.2.3 Etat de contrainte dans le tube

III.2.3.1 Contraintes dues à la pression interne et externe

L'état de contrainte dans la paroi du tube soumis à des pressions internes et externes uniformes dérivent de la théorie de l'élasticité linéaire. Il se compose des contraintes radiale σ_{rr} et circonférentielle $\sigma_{\theta\theta}$.

Leurs expressions sont :

$$\sigma_{rr} = A - \frac{B}{r^2} \qquad [\text{III-12}]$$

$$\sigma_{\theta\theta} = A + \frac{B}{r^2} \qquad [\text{III-13}]$$

$$\text{avec } A = \frac{p_i S_i - p_e S_e}{S_p} \; ; \; B = \frac{(p_i - p_e) S_e S_i}{\pi S_p}$$

III.2.3.2 Contrainte longitudinale due à la tension axiale

La tension axiale T_{vraie} agit sur la section transversale du tube S_p . La contrainte longitudinale s'écrit :

$$\sigma_{T_{vraie}} = \frac{T_{vraie}}{S_p}$$

En introduisant la notion de contrainte effective σ_{eff} , rapport de la tension effective sur la section de paroi, la contrainte longitudinale due à la tension axiale s'écrit ([III-3]) :

$$\sigma_{T_{vraie}} = \sigma_{eff} + A \qquad [\text{III-14}]$$

$$\text{avec } \sigma_{eff} = \frac{T_{eff}}{S_p} \; ; \; T_{eff} = T_o + w_{app,fluide[i]} z$$

III.2.3.3 Contrainte due à la flexion

En supposant que les sections transversales à l'axe de la canalisation restent droites après flexion, alors la théorie des poutres apporte la relation entre le rayon de courbure ([III-6]) de la conduite (assimilée à une poutre) et la déformation dans la section transversale en un point distant de r de sa génératrice :

$$\varepsilon_{nn}(r,x) = \frac{r}{R_c(x)} \qquad [\text{III-15}]$$

Par application de la loi de Hooke, cette contrainte est proportionnelle à la déformation :

$$\sigma_{nn}(r,x) = E\varepsilon_{nn}(r,x) \qquad [\text{III-16}]$$

En combinant les deux dernières équations, on déduit l'expression de la contrainte de flexion agissant sur la facette perpendiculaire à l'axe du tube :

$$\sigma_{flex}(r,x) = \frac{E.r}{R_c(x)} \qquad [\text{III-17}]$$

Le moment de flexion est déterminé par intégration de la contrainte sur la facette transversale S_p,

$$Mf(x) = \iint_S r\,\sigma_{flex}(r,x)dS = \iint_S \frac{Er^2}{R_c(x)}dS \qquad [\text{III-18}]$$

Pour un matériau homogène, E et $R_c(x)$ étant indépendants de la variable d'intégration, on déduit l'expression du moment fléchissant :

$$Mf(x) = \frac{E.I_{Oy}}{R_c(x)} \qquad [\text{III-19}]$$

avec I_{Oy} moment d'inertie géométrique de la section transversale du tube.

Le graphique suivant présente l'évolution de la tension axiale et du moment de flexion normés en fonction de la distance au sol. Le moment de flexion trouve un maximum au point de touche et décroît rapidement lorsque la ligne atteint la surface. La tension dans la ligne évolue à l'inverse du moment de flexion.

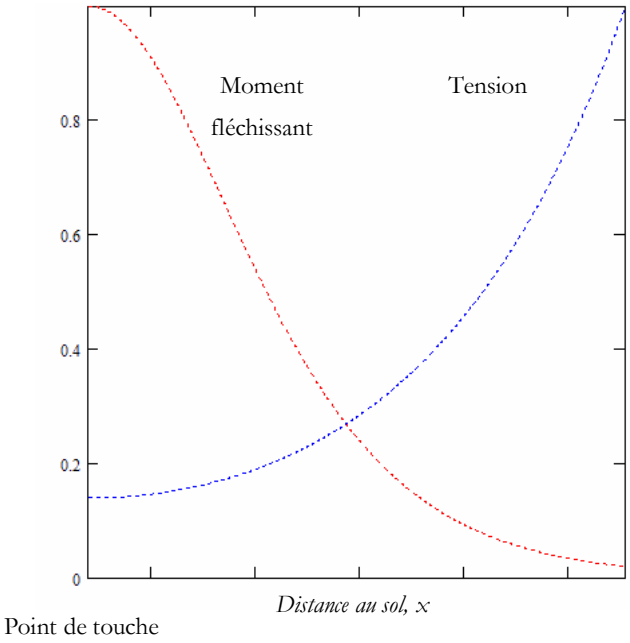


Figure III-4 : Tension axiale et moment de flexion dans une canalisation caténaire (statique)

Cette représentation met en évidence deux zones remarquables de la canalisation. Elles sont situées aux extrémités où la tension est maximale en tête et la flexion est maximale en pied de caténaire. L'approche habituellement utilisée par les bureaux d'études consiste à étudier ces deux zones en particulier, c'est pourquoi nous limiterons l'étude de la canalisation aux extrémités.

III.2.3.4 Critère de résistance mécanique

Le calcul de la contrainte de Von Mises permet de vérifier si le matériau d'une pièce sollicitée mécaniquement atteint le seuil de plasticité.

Pour un état de contrainte triaxial, la contrainte de Von Mises s'exprime sous la forme :

$$2\sigma_{vm}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2$$

Le critère de Von Mises s'écrit en tenant compte d'un coefficient de sécurité C_r appliqué sur la limite élastique Y du matériau [API99]. Dans cette norme, on recommande de fixer le coefficient de sécurité à 0,7 :

$$\frac{C_r Y}{\sigma_{vm}} \geq 1 \qquad [\text{III-20}]$$

On utilise le critère de Von Mises afin de mettre en évidence une limite d'utilisation des matériaux. Il pourra être nécessaire de définir un critère adapté à chaque matériau qui prenne en compte le mode de dégradation et/ou de rupture.

III.2.4 Conditions de satisfaction des astreintes

III.2.4.1 Résister au poids propre en surface

L'analyse fonctionnelle montre qu'en phase d'installation la ligne doit supporter son propre poids. L'analyse statique développée au paragraphe III.2.2 donne l'expression de la tension axiale T_{vraie} dans la conduite, fonction des efforts de pression et du poids :

$$T_{vraie} = T_{eff} - p_e S_e + p_i S_i \qquad [\text{III-21}]$$

avec

$$T_{eff} = T_o + w_{app,fluide[i]} z$$

$$T_o = a w_{app,fluide[i]}$$

En condition normale de pose la ligne est vide. Cependant, les recommandations de conception en vigueur [API99] imposent de considérer le cas d'envahissement accidentel de la ligne par l'eau de mer. On fait l'hypothèse que le matériau a une masse volumique supérieure à celle de l'eau. Pour être conservatif, le dimensionnement doit considérer le poids de la colonne d'eau dans le calcul du poids apparent de la ligne. Les conditions à prendre en compte en surface sont :

$$\rho_i = \rho_e$$

$$p_i = p_e = 1 bar$$

$$z = H_o$$

$$w_{app,eau} = (\rho - \rho_e) S_p g$$

Ces conditions permettent de simplifier l'écriture de la tension axiale car les efforts de pression peuvent être négligé :

$$p_e S_e - p_i S_i \approx 0$$

et

$$A \approx 0$$

La tension axiale dans la conduite s'écrit :

$$T_{vraie} = T_{eff} = T_o + w_{app,eau} H_o = (a + H_o) w_{app,eau}$$

On définit le coefficient de chaînette C_c tel que

$$T_{vraie} = C_c w_{app,eau} H_o$$

Et par application directe de cette relation on déduit sa valeur pour un angle en tête de 6°. Dans ce cas C_c est égal à 1,12 :

$$C_c = \frac{1}{\cosh[\arcsin h(\tan \varphi_0)] - 1} + 1 \qquad [\text{III-22}]$$

On introduit le coefficient d'amplification dynamique C_d permettant de prendre en compte les effets hydrodynamiques. Après avis d'expert, le coefficient d'amplification dynamique est pris égal à 1,15.

On déduit une nouvelle expression de la tension agissant suivant l'axe du tube :

$$T_{vraie} = C_d C_c w_{app,eau} H_o \qquad [\text{III-23}]$$

La contrainte axiale agissant dans la section transversale en surface est tirée de [III-14], en tenant compte des conditions aux limites ($A \approx 0$), il vient :

$$\sigma_{T_{vraie}} = C_c C_d H_o (\rho - \rho_e) g \qquad [\text{III-24}]$$

Par application du critère de Von Mises (III.2.3.4), on établit le critère de satisfaction de l'astreinte relative au poids propre. Un matériau de masse volumique ρ et de limite élastique Y est acceptable si la condition suivante est vérifiée :

$$\frac{C_r Y}{C_c C_d H_o (\rho - \rho_e) g} \geq 1 \qquad [\text{III-25}]$$

III.2.4.2 Ne pas dépasser la tension admissible de la tour

La tour de pose du bateau d'installation est équipée d'un système de serrage qui maintient la ligne en surface. Ce mécanisme a été dimensionné pour supporter une tension maximale $T_t^{\max}$ de 7500 kN.

En prenant le cas le plus défavorable (ligne pleine d'eau), on déduit de [III-23] la tension imposée par la canalisation sur la tour de pose.

En utilisant les notations précédentes et en prenant en compte les effets hydrodynamiques,

le critère de satisfaction de cette astreinte s'écrit pour un matériau de masse volumique ρ :

$$C_d C_c H_o w_{app,eau} \leq T_t^{\max} \qquad \text{[III-26]}$$

Pour un matériau donné, on déduit ensuite l'épaisseur maximale admissible pour satisfaire l'astreinte.

III.2.4.3 Résister à la pression hydrostatique et la flexion au point de touche

Les conditions au point de touche sont :

$x = 0$	origine des axes,
$z = 0$	
$p_i = \rho_i g H_0 \approx 1 bar$	pression dans la ligne à vide (poids de la colonne d'air négligé)
$w_{app,vide} = (\rho S_p - \rho_e S_e) g$	poids apparent de la ligne vide,
$p_e = \rho_e g H_0$	pression hydrostatique à la profondeur H_o,
$R_c(0) = a$	rayon de courbure au point de touche.

Le paragraphe III.2.3.1 donne l'expression des contraintes radiale et circonférentielle. La contrainte longitudinale découle des efforts de tension (paragraphe III.2.3.2) et de flexion (paragraphe III.2.3.3).

L'expression de la contrainte de Von Mises est immédiate. Il vient :

$$(\sigma_{vm})^2 = (\sigma_{eff} + \sigma_{flex})^2 + 3\left(\frac{B}{r^2}\right)^2 \qquad \text{[III-27]}$$

avec

$$\sigma_{flex}(r) = \frac{E.r}{a}$$

$$\sigma_{eff} = \frac{T_o}{S_p} = \frac{a.w_{app}}{S_p}$$

$$B = \frac{(p_i - p_e) S_e S_i}{\pi S_p}$$

D'après le critère de Von Mises, un matériau est acceptable si la contrainte équivalente de Von Mises ne dépasse pas sa limite élastique Y ,

$$\frac{C_r Y}{\sigma_{vm}} \geq 1 \qquad \text{[III-28]}$$

Le critère de résistance doit être satisfait quelle que soit la position dans l'épaisseur. Il suffit de chercher le maximum de la fonction 'contrainte de Von Mises' et de le comparer au produit de la limite élastique et du coefficient de sécurité pour déterminer l'épaisseur minimale de matière. Or, pour un matériau donné, le maximum de cette fonction ne s'exprime pas de façon analytique et une résolution numérique est nécessaire. Toutefois la fonction 'contrainte Von Mises' possède une propriété remarquable sur laquelle on peut s'appuyer pour résoudre le problème analytiquement.

On introduit la fonction $f(r)$ définie par :

$$f(r) = \sigma_{vm}^2 = (\alpha + \beta r)^2 + \frac{\gamma}{r^4}$$

avec

$$\alpha = \sigma_{eff}\,,\ \beta = \frac{E}{a}\,,\ \gamma = 3B^2$$

Les dérivées première et seconde de f sont,

$$f'(r) = 2\beta(\alpha + \beta r) - \frac{4\gamma}{r^5}$$

$$f''(r) = 2\beta^2 + \frac{20\gamma}{r^6}$$

Par conséquent, pour tout $r > r_o$, f est une fonction convexe car sa dérivée seconde est strictement positive.

Or si f est convexe sur un intervalle $[A, B]$ alors une propriété de f est qu'elle se situe toujours sous la droite paramétrée g définie par :

$$g(t_o) = t_o f(B) + (1 - t_o) f(A)$$

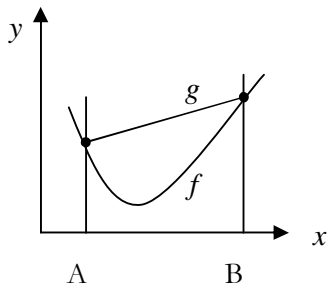
avec

$$t_o \in [0,1]$$

Cette propriété se traduit par :

$$\forall x \in [A, B] \text{ et } t_o \in [0,1],\ f(x) \leq g(t_o)$$

Une schématisation graphique de cette propriété serait,



On peut alors considérer deux cas, soit $f(A) < f(B)$, soit $f(B) < f(A)$. Selon le cas on aura respectivement, $f(r) < f(B)$ ou $f(r) < f(A)$ et la fonction f est bornée sur $[A, B]$ par valeur supérieure

La fonction racine étant croissante sur $[0,+\infty]$, on peut déduire que la fonction contrainte de Von Mises trouve un maximum soit sur la borne inférieure soit sur la borne supérieure. Par conséquent, il suffit de calculer cette fonction aux bornes et de prendre le maximum des deux valeurs pour ensuite pouvoir appliquer le critère de résistance et calculer l'épaisseur minimale nécessaire pour un matériau donné.

III.2.4.4 Etre stable dans l'eau

En phase d'installation ou en phase de service, la canalisation doit être pesante dans l'eau. Un corps solide étanche immergé est soumis à son poids propre et à la poussée d'Archimède. Ces forces s'opposent et la résultante est le poids apparent $R = P - A$ où P est le poids à vide dans l'air et A est la poussée d'Archimède. Si la résultante est positive, le corps immergé est naturellement pesant dans l'eau.

Soit P/A le poids spécifique dans l'eau du corps solide, le critère de stabilité est tel que le poids spécifique soit strictement supérieur à 1. En prenant une fine marge de sécurité et en accord avec une norme offshore [DNV88], le critère de stabilité s'exprime sous la forme d'un critère de flottabilité et ce critère est respecté si le poids spécifique est strictement supérieur à 1,1 :

$$\frac{P}{A} > 1{,}1$$

Le cas le plus critique à considérer est celui où la ligne vide et dans ce cas, le poids linéique dans l'air de la ligne est :

$$P = w_{air,vide} = \rho S_p g$$

Le poids linéique du volume d'eau déplacé est :

$$A = w_{eau} = \rho_e S_e g$$

Le critère de flottabilité est satisfait si un matériau de masse volumique ρ respecte la condition suivante :

$$\frac{\rho S_p}{\rho_e S_e} > 1{,}1 \qquad \text{[III-29]}$$

III.2.4.5 Résister à la rupture par flambage

Timoshenko [TIM61] se base sur les travaux de Bryan [BRY88] et donne une expression de la pression critique de flambement d'un tube long et mince. Il considère un anneau uniformément chargé sur son contour. En supposant que cet anneau ait subi une légère déformation, la valeur critique de flambement est calculée en considérant l'anneau en équilibre. La pression critique de flambement appelée *pression d'instabilité* s'écrit pour un tube long :

$$p_{instab} = \frac{2Ee^3}{(1-\nu^2)D_m^3}$$

avec

D_m, diamètre moyen

Le critère est établi en comparant la pression d'instabilité et la pression hydrostatique $p_e(z)$ auquel on applique un coefficient de sécurité C_f. Conformément aux spécifications techniques imposées par les normes de dimensionnement offshore en vigueur [DNV07], on prend C_f égal à 0,67.

On considère le cas le plus défavorable où la ligne est vide (pression interne de 1 bar) et où la profondeur est maximale. Un matériau de module d'élasticité E et de coefficient de Poisson ν est acceptable si la condition suivante est vérifiée :

$$\frac{2Ee^3}{(1-\nu^2)D_m^3} \geq \frac{\rho_e g H_o}{C_f} \qquad \text{[III-30]}$$

III.2.4.6 Respecter l'encombrement imposé par le système de serrage

La tour de pose en J est équipée d'un système de serrage qui maintient la ligne en surface en évitant son glissement. Ce système de serrage a été prévu pour que le navire soit capable de

poser des conduites possédant un diamètre extérieur allant jusqu'à 22 pouces (noté $d_{e\max}$).

Connaissant le diamètre intérieur d_o de la conduite, on déduit l'épaisseur maximale admissible de la paroi du tube e_{adm} :

$$e_{adm} = \frac{d_{e\max} - d_o}{2} \qquad [\text{III-31}]$$

L'astreinte sur l'encombrement est satisfaite si l'épaisseur de la paroi du tube e ne dépasse pas l'épaisseur maximale admissible :

$$e \le e_{adm} \qquad [\text{III-32}]$$

III.3 Description et analyse de la conduite en phase de service

III.3.1 Etude mécanique de la conduite

III.3.1.1 Analyse du tube sous pression interne et externe

En phase de service, la conduite repose sur le sol marin et transporte de l'huile de production à une température de 90°C et une pression de 350 bars (voir Tableau 4.3). On supposera dans cette analyse que :

a) le sol marin est parfaitement plan et horizontal de sorte que l'on néglige les variations de pression au sol,

b) les efforts de contact avec le sol sont négligeables ; ainsi on suppose que la conduite est uniquement soumise à une pression externe uniforme et la tension effective est nulle,

c) les efforts hydrodynamiques dus aux courants marins sont négligeables,

d) il n'y a pas de blocage en déplacement suivant l'axe du tube ; ainsi on néglige les efforts de compression qui auraient pu être induits par les variations de température.

Le champ de contrainte admet, en chaque point, pour directions principales les directions de la base locale des coordonnées cylindriques (r, θ, z) :

$$\sigma_{rr} = A - \frac{B}{r^2} \qquad [\text{III-33}]$$

$$\sigma_{\theta\theta} = A + \frac{B}{r^2} \qquad [\text{III-34}]$$

$$\sigma_{zz} = A \quad \text{(avec } \sigma_{eff} \text{ négligé éq. [III-21])} \qquad \text{[III-35]}$$

avec

$$A = \frac{p_i S_i - p_e S_e}{S_p}$$

$$B = \frac{(p_i - p_e) S_e S_i}{\pi S_p}$$

En conservant les mêmes notations qu'au paragraphe précédent, on déduit l'expression de la contrainte équivalente de Von Mises, évaluée en un point quelconque de la canalisation :

$$\sigma_{vm}(r) = \frac{\sqrt{3}|B|}{r^2} \qquad \text{[III-36]}$$

On remarquera que la contrainte de Von Mises est maximale sur la paroi interne de la conduite.

III.3.1.2 Condition de satisfaction de l'astreinte de résistance aux pressions en service

Cette condition découle immédiatement de l'application du critère de Von Mises. Un matériau de limite élastique Y est acceptable s'il vérifie la condition suivante :

$$\sigma_{vm}(r_i) \leq C_r Y \qquad \text{[III-37]}$$

III.3.2 Etude thermique de la conduite

III.3.2.1 Définition du coefficient d'échange global

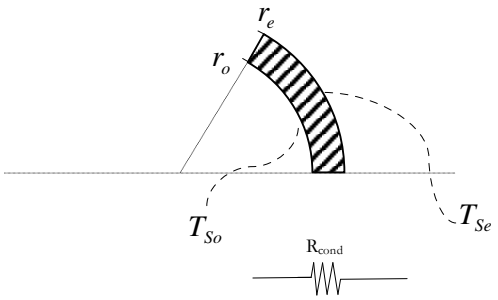


Figure III-5 : Section transversale d'une conduite cylindrique, recherche de la distribution de température

On cherche à évaluer le gradient de température dans la direction radiale. Le problème est monodimensionnel, en régime permanent et sans production de chaleur.

Dans ces conditions, l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques s'exprime pour un matériau de conductivité thermique λ :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}\right) = 0$$

On connaît la température de l'effluent et de l'eau de mer et on en déduit les conditions aux limites en température :

$$T(r_e) = T_{Se}$$
$$T(r_o) = T_{So}$$

Par résolution de l'équation de la chaleur, la distribution de température suit la fonction suivante :

$$T(r) = \frac{T_{So} - T_{Se}}{Ln(r_o / r_e)} Ln\left(\frac{r}{r_e}\right) + T_{Se}$$

Les échanges thermiques se font par conduction. La loi de Fourier exprime le flux de chaleur à travers la paroi du tube de longueur L,

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dr}$$

avec

$A = 2\pi r_o L$, section d'échange perpendiculaire au flux thermique si on se place à $r = r_o$

On en déduit l'expression du flux d'échange :

$$q = -2\pi\lambda L \frac{T_{So} - T_{Se}}{Ln(r_o / r_e)}$$

Par définition, la résistance thermique est le rapport entre l'écart de température et le flux associé :

$$R_{cond} = \frac{\Delta T}{q}$$

On introduit la grandeur U qui caractérise l'échange global thermique par conduction

pour un matériau de conductivité thermique λ :

$$U = \frac{1}{AR_{cond}}$$

$$U = \frac{\lambda}{r_o Ln\left(\frac{r_o}{r_o + e}\right)} \qquad \text{[III-38]}$$

III.3.2.2 Estimation du besoin en isolation thermique

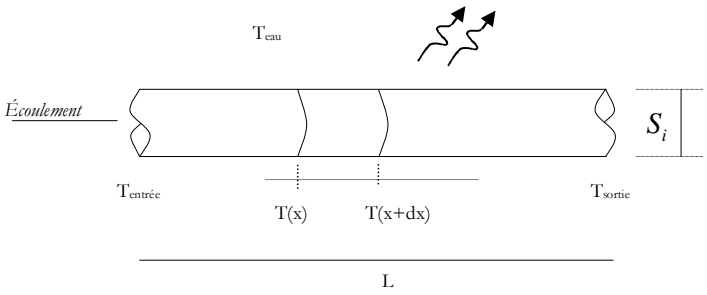


Figure III-6 : Schéma de conduite, bilan énergétique pour une conduite de section S_i

Bilan énergétique

On fait l'hypothèse que l'écoulement du fluide à travers la conduite s'effectue à pression constante (les pertes de charges sont négligées ; d'après l'avis d'experts, elles sont inférieures à 1 bar par kilomètre). Les propriétés du fluide de production (polyphasique) sont donc considérées comme constantes au cours du transport. Les pertes thermiques le long de la conduite sont uniquement dues à la diffusion à travers la paroi du tube par conduction.

En régime permanent, le flux convectif entrant est égal au flux convectif sortant plus les pertes thermiques par diffusion à travers la paroi (Figure III-6). L'équation de conservation d'énergie s'écrit $\Delta\phi - \phi_{cond} = 0$. La température de l'eau de mer T_{eau} est de 4°C. La température d'entrée $T_{entrée}$ est fixée à la température de tête de puits (90°C). La température minimale en sortie de ligne T_{sortie} après un parcours de quelques dizaines de kilomètres doit se situer au-dessus de la température de formation de paraffine. Les propriétés du fluide de production sont données : la vitesse moyenne du fluide de production $\overline{V_i}$ se situe entre 0,5 et 1,5m.s^{-1}, la chaleur spécifique C_p est de l'ordre de 1900 J.kg^{-1}.K^{-1} ; la masse volumique du fluide en circulation notée ρ_i est 800 kg.m^{-3}. L'équation de conservation d'énergie donne sur la section utile S_i de la

conduite :

$$\rho_i C_p S_i \overline{V_i} T = \rho_f C_p S_i \overline{V_i} (T + dT) + U dS \Delta T$$

avec

U , le coefficient d'échange thermique par conduction

dS , la surface d'échange correspondant à la longueur dx, donc $dS = 2\pi r_o dx$

De cette équation, on tire le coefficient d'échange requis qui traduit le besoin en isolation, pour les conditions de température données, le diamètre de la conduite et le type de fluide transporté :

$$U_o = \frac{\rho_i C_p d_o \overline{V_i}}{4L} Ln \frac{T_{entrée} - T_{eau}}{T_{sortie} - T_{eau}}$$

L'application numérique pour une conduite de 12" (diamètre hydraulique d_o) sur 40km donne la valeur du coefficient d'échange thermique requis pour assurer un transport de fluide sans dépôt de paraffine en régime continu : U_o est alors égal à 0,7W.m^{-2}.K^{-1}. Dans cette application numérique, la température de formation de paraffine est fixée à 32°C.

III.3.2.3 Condition de satisfaction de l'astreinte relative aux pertes thermiques

D'après l'étude thermique de la conduite qui vient d'être exposée, on sait qu'assurer l'écoulement du fluide de production dans de bonnes conditions revient à imposer une condition sur le coefficient d'échange thermique global de la section de conduite. Ce coefficient d'échange est inversement proportionnel à la résistance thermique de la conduite. Les pertes thermiques par conduction seront d'autant plus importantes que ce coefficient est élevé.

On a également présenté, une méthode permettant d'évaluer le besoin en isolation thermique. Par conséquent, un matériau de conductivité thermique λ est acceptable si le coefficient d'échange thermique de la conduite est inférieur au coefficient d'échange requis. Ce critère se traduit directement par la condition suivante :

$$U \leq U_o \qquad \text{[III-39]}$$

avec

$U_o = 0,7$ W.m^{-2}.K^{-1}

$$U = \frac{\lambda}{r_o Ln\left(\frac{r_o}{r_o + e}\right)}$$

IV. ETUDE MECANIQUE ET THERMIQUE D'UNE CONDUITE SOUS-MARINE (PAROI MULTIMATERIAU)

IV.1 Introduction

Prenons une conduite multimatériau. Elle peut être décrite de façon simple comme une structure cylindrique dont la paroi est constituée de l'association de plusieurs couches concentriques. Chaque couche est caractérisée par un matériau et une épaisseur. La conception de la conduite multimatériau a pour but de proposer quelles sont les solutions d'association de matériaux acceptables et optimisées ; on cherche les solutions respectant l'ensemble des astreintes du cahier des charges et de cet ensemble on extrait les solutions les plus performantes.

Le bilan des astreintes de conception (Tableau **IV-1**) est tiré de l'analyse fonctionnelle. Il montre que la conduite est soumise à des astreintes dépendant de son comportement thermique et mécanique.

Tableau IV-1 : Extrait des astreintes de conception pour la conduite multimatériau

Astreintes de conception (sans les astreintes de durabilité)
Résistance au poids propre
Résistance à l'installation (flexion, tension, pression)
Résistance au flambage
Résistance en service
Isolation thermique
Stabilité dans l'eau (flottabilité)
Tension en tête
Système de serrage

Ce chapitre présente successivement les caractéristiques du multicouche et les hypothèses des modèles de mécanique et de thermique utilisées dans l'étude. Cette étude d'une conduite sous-marine à paroi multimatériau conduit à établir les conditions de satisfaction des astreintes de conception du problème.

IV.2 Hypothèses et démarche

Données du problème et hypothèses

L'étude du comportement mécanique et thermique de la conduite multicouche nécessite de connaître sa géométrie, le bilan des actions extérieures, le ou les matériaux et les relations entre les couches.

- Les caractéristiques géométriques de la canalisation multicouche sont décrites en supposant que les couches sont concentriques, d'épaisseurs uniformes et faibles devant le rayon de la canalisation. Par conséquent, on suppose que les contraintes sont uniformes dans l'épaisseur. Les épaisseurs de chaque couche sont les inconnues du problème. Une description complète est proposée au paragraphe IV.3
- Les matériaux sont extraits de la base de donnée (annexe I). On suppose, dans le cadre d'une démarche de conception préliminaire, que le comportement des matériaux est élastique linéaire. Pour une combinaison de matériaux donnée, nous établissons les conditions de satisfaction des astreintes de conception.
- Les relations entre deux couches consécutives sont décrites en supposant une interface d'épaisseur nulle et la continuité des déplacements.
- Le bilan des actions extérieures est tiré de l'analyse de la conduite à paroi simple (annexe III). Ce bilan montre que l'on peut diviser l'analyse du multicouche en deux parties. Dans une première partie, on considèrera les chargements axisymétriques, c'est-à-dire les actions des efforts de pression interne et externe ainsi que les efforts de tension. Dans une seconde partie, on analysera l'action mécanique de la flexion le long de la canalisation.

Réponse aux sollicitations axisymétriques

La réponse de la canalisation multicouche aux sollicitations axisymétriques de tension et de pression est étudiée en considérant une structure infiniment longue. En se positionnant suffisamment loin des extrémités, on s'affranchit de la prise en compte des effets de bords et par conséquent des élongations différentielles entre les couches. Par ailleurs, l'étude des contraintes est réalisée en supposant la continuité des déplacements aux interfaces et l'hypothèse de couches minces permet de supposer l'uniformité des déformations dans l'épaisseur du multicouche. A titre d'exemple, nous appliquons ces hypothèses au problème d'une poutre multicouche sollicitée en traction suivant la direction parallèle à l'empilement.

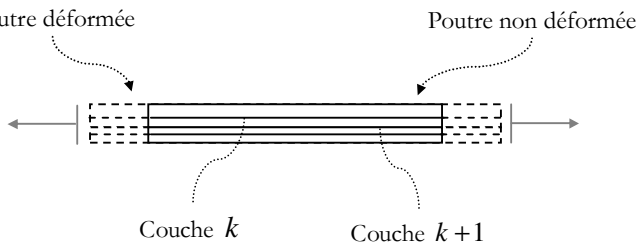


Figure IV-1 : Poutre multicouche sollicitée en traction

La théorie de l'élasticité linéaire permet de montrer que la déformation est identique entre deux couches consécutives k et $k+1$:

$$\varepsilon^k = \varepsilon^{k+1}$$

En supposant par ailleurs que chaque matériau suit la loi de Hooke. Pour une couche k donnée, on a :

$$\sigma^k = E_k \varepsilon^k$$

En combinant les deux relations précédentes, on a pour deux couches consécutives :

$$\frac{\sigma^k}{E_k} = \frac{\sigma^{k+1}}{E_{k+1}}$$

Réponse à la sollicitation de flexion

L'étude de la canalisation proposée en annexe III a permis de montrer qu'à l'équilibre statique, la canalisation prend une forme particulière dite de caténaire. Par conséquent, la courbure $R_c(x)$ (équation [III-6]) imposée à la canalisation est connue le long de la ligne.

Connaissant la courbure $R_c(x)$, en utilisant la théorie des poutres, on déduit l'expression des déformations longitudinales :

$$\varepsilon_{nn}(r,x) = \frac{r}{R_c(x)}$$

Démarche

Pour une combinaison de matériaux donnée, connaissant les efforts extérieurs appliqués à la conduite (voir annexe III), on déduit l'état de contrainte dans chaque couche. Ensuite, on établit les conditions de satisfaction des astreintes de conception. Ces conditions dérivent du critère de Von Mises et permettent pour les astreintes mécaniques de déterminer les dimensions de chaque couche nécessaires.

IV.3 Caractéristiques du tube multicouche et notations

Géométrie

On considère un tube dont la paroi est constituée d'un empilement de n couches concentriques. Chaque couche est repérée par un indice k compris entre 1 et n.

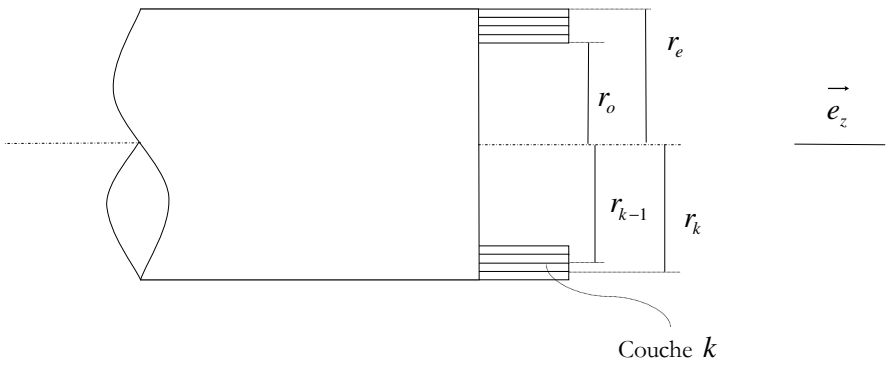


Figure IV-2 : Caractéristiques du tube multicouche

On définit pour une couche k de l'empilement :

r_k	rayon externe,
r_{k-1}	rayon interne,
$e_k = r_k - r_{k-1}$	épaisseur,
$S_{zz}^k = \pi\left(r_k^2 - r_{k-1}^2\right)$	aire de la face de normale $\vec{e}_z$,
$S_{\theta\theta}^k = 2\left(r_k - r_{k-1}\right)$	aire de la face de normale $\vec{e}_\theta$ pour un tube de longueur unité,

Les caractéristiques du tube sont définies par :

r_o	rayon interne,
$\bar{e} = \sum_n e_k$	épaisseur totale,
$r_e = r_o + \bar{e}$	rayon externe,
ν_k	fraction volumique d'une couche rapportée au volume total du tube de longueur unitaire,
$\bar{S} = \sum_n S_{zz}^k = \pi\bar{e}\left(2r_o + \bar{e}\right)$	aire totale de la section transversale de normale $\vec{e}_z$.

ou $\bar{S} = \dfrac{S_{zz}^k}{\nu_k}$

Matériaux

Les propriétés matériaux d'une couche k sont notées :

E_k module d'élasticité,

ρ_k masse volumique,

Y_k limite élastique,

υ_k coefficient de Poisson,

λ_k coefficient de conductivité thermique.

Les propriétés équivalentes du multicouche sont :

$\overline{E} = \sum_n E_k v_k$ module d'élasticité,

$\overline{\rho} = \sum_n v_k \rho_k$ masse volumique.

Masse

Les propriétés intrinsèques des matériaux et les caractéristiques géométriques permettent de définir :

$\mu_k = \rho_k S_{zz}^k$ la masse linéique d'une couche k,

$\overline{\mu} = \sum_n \mu_k = \sum_n v_k \rho_k \overline{S} = \overline{\rho}\overline{S}$ la masse linéique de la conduite.

Poids linéique

$w_{air} = \overline{\mu} g$ pour la conduite vide dans l'air,

$w_{app,vide} = w_{air} - \rho_e S_e g$ pour la conduite vide dans l'eau,

$w_{app,fluide[i]} = w_{air} - \rho_e S_e g + \rho_i S_i g$ pour la conduite dans l'eau pleine d'un fluide i,

$w_{app,eau} = \left(\overline{\rho} - \rho_e\right)\overline{S} g$ pour la conduite dans l'eau pleine d'eau.

IV.4 Conditions de satisfaction des astreintes en installation

IV.4.1 Résister au poids propre en surface

Le paragraphe III.2 donne l'expression de la tension axiale appliquée sur la conduite en surface :

$$T_{vraie} = C_c C_d w_{app,pleine}$$

avec C_c et C_d, les coefficients de chaînette et d'amplification dynamique, définis au paragraphe III.2.4.1.

En coupant virtuellement la conduite suivant une facette de normale portée par l'axe de la conduite, on écrit l'équilibre de la conduite entre les efforts internes et les efforts externes. Par projection sur l'axe de la conduite, l'équilibre statique s'écrit :

$$-\iint \sigma_{zz} dS + T_{vraie} = 0$$

Par hypothèse, la déformation est uniforme dans la section droite, les contraintes normales à la section droite sont uniformes dans l'épaisseur d'une couche. Par conséquent, les efforts internes s'écrivent sous la forme :

$$\iint \sigma_{zz} dS = \sum_n \sigma_{zz}^k S_{zz}^k = \sum_n \sigma_{zz}^k v_k \overline{S}$$

L'équilibre statique sur la facette perpendiculaire à l'axe du tube est alors :

$$\sum_n \sigma_{zz}^k v_k \overline{S} = T_{vraie} = C_c C_d \left(\overline{\rho} - \rho_e\right) \overline{S} g$$

Les déformations axiales étant uniformes entre deux couches consécutives, on a :

$$\varepsilon_{zz}^k = \varepsilon_{zz}^{k+1} = \varepsilon$$

On montre alors que la contrainte dans une couche k donnée s'écrit :

$$\sigma_{zz}^k = C_c C_d H_o \left(\overline{\rho} - \rho_e\right) g \frac{E_k}{\overline{E}} \qquad \text{[IV-1]}$$

Le critère de Von Mises exposé au paragraphe III.2.3.4 permet d'établir la condition de satisfaction de l'astreinte sur le poids en tête. On définit le rapport de résistance R_k dans chaque couche. Une combinaison de matériaux donnée est acceptable si la condition suivante est vérifiée dans chacune des couches notée k :

$$R_k = \frac{C_r Y_k}{\sigma_{zz}^k} \geq 1 \qquad \text{[IV-2]}$$

IV.4.2 Ne pas dépasser la tension admissible de la tour

La condition de satisfaction de cette astreinte est tirée du paragraphe III.2.4.2. Appliquée au cas du multicouche, on conclut qu'une combinaison de matériaux est acceptable si :

$$C_d C_s H_o w_{app,pleine} \leq T_t^{\max} \qquad [\text{IV-3}]$$

IV.4.3 Résister à la flexion et la pression hydrostatique au point de touche

On étudie successivement les contraintes dans la conduite soumise aux efforts de pression, de tension et aux efforts de flexion imposés par la forme caténaire de la canalisation. On en déduira la condition de satisfaction de l'astreinte par application du critère de Von Mises dans chaque couche.

Efforts de pression

On considère le tube multicouche soumis aux efforts de pression interne et externe. En séparant virtuellement ce corps suivant une coupure de normale $\vec{n}_f$ (voir Figure IV-3), on fait intervenir les efforts internes liés aux contraintes circonférentielles dans les couches k.

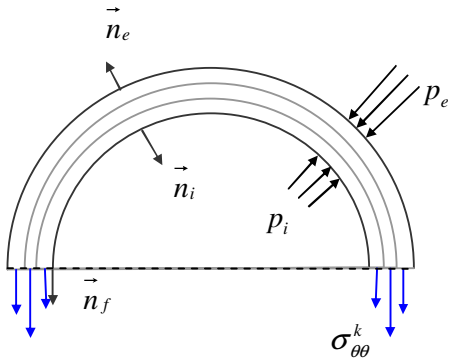


Figure IV-3 : Contraintes circonférentielles dans le multicouche

L'équilibre statique de cette structure coupée virtuellement impose que la somme des efforts $d\vec{f}$ et $\vec{F}_{ext}$ soit nulle :

$$\iint_S d\vec{f} + \sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$$

La projection des efforts externes sur l'axe porté par $\vec{n}_f$ conduit pour un tube de longueur unité à la relation suivante :

$$\left\| \sum \vec{F}_{ext} \right\| = p_e S_{\theta\theta,e} - p_i S_{\theta\theta,i} = 2r_e p_e - 2r_o p_i$$

Le poids de la colonne de gaz dans la conduite étant négligeable, on considère que la pression interne dans la conduite est proche de la pression atmosphérique. La conduite est posée dans des profondeurs dépassant 2000 mètres, par conséquent, l'ordre de grandeur des efforts de pression externe devant les efforts de pression interne conduit à négliger ces derniers et les efforts extérieurs se réduisent à :

$$\left\| \sum \vec{F}_{ext} \right\| = 2r_e p_e$$

La projection des efforts internes sur l'axe porté par $\vec{n}_f$ conduit pour un tube de longueur unité à :

$$\iint_S d\vec{f}.\vec{n}_f = -\iint \sigma_{\theta\theta} dS$$

En supposant les parois minces, les contraintes sont uniformes dans chacune des couches et l'épaisseur d'une couche est donnée par le produit de la fraction volumique de la couche et de l'épaisseur totale du multicouche. Cette hypothèse conduit à une expression simplifiée des efforts internes :

$$\iint_S \sigma_{\theta\theta} dS = \sum_n \sigma_{\theta\theta}^k S_{\theta\theta}^k = \sum_n \sigma_{\theta\theta}^k 2(r_k - r_{k-1}) = 2\sum_n \sigma_{\theta\theta}^k e_k = 2\bar{e}\sum_n \sigma_{\theta\theta}^k v_k$$

Si on suppose que chaque matériau du multicouche suit la loi de Hooke (paragraphe IV.2) et que l'épaisseur de chaque couche est faible devant le rayon ($\varepsilon_{\theta\theta}^k = \varepsilon$), on peut déduire une expression de la contrainte circonférentielle dans une couche k donnée :

$$\sigma_{\theta\theta}^k = \frac{E_k}{\bar{E}} \cdot \frac{-(r_o + \bar{e})p_e}{\bar{e}} \qquad [\text{IV-4}]$$

Efforts de tension

L'expression générale de l'effort de tension a été étudiée au paragraphe III.2.2.3 :

$$T_{vraie} = T_{eff} - p_e S_e + p_i S_i$$

avec $T_{eff} = T_o + zw_{app}$

Les conditions applicables au point de touche sont présentées au paragraphe III.2.2.4. On déduit le poids linéique apparent et l'expression de la tension :

$$w_{app,vide} = \left(\overline{\rho S} - \rho_e S_e\right) g$$

$$T_{vraie} = T_{eff} - p_e S_e$$

avec $T_{eff}(0) = a w_{app,vide}$

L'équilibre statique de la structure coupée virtuellement suivant une facette perpendiculaire à l'axe permet d'introduire la contrainte axiale dans chaque couche σ_{zz}^k agissant sur les facettes de section S_{zz}^k de normale z :

$$\sum_k \sigma_{zz}^k S_{zz}^k = T_{vraie}$$

Les hypothèses introduites au paragraphe IV.2 sur les relations entre les couches permettent de déduire l'expression de la contrainte longitudinale agissant dans chaque couche :

$$\sigma_{zz}^k = \frac{E_k}{\overline{E}} \cdot \frac{\left(a\overline{\rho S} - C_s H_o \rho_e S_e\right) g}{\overline{S}} \qquad [\text{IV-5}]$$

Efforts de flexion

On a montré que la position d'équilibre statique de la conduite suit une forme connue, dite de caténaire, de rayon de courbure connu. La conduite étant modélisée par une poutre, on dispose d'une relation entre la déformation dans l'épaisseur $\varepsilon_{zz}(r)$ et le rayon de courbure $R_c(x)$:

$$\varepsilon_{zz}(r,x) = \frac{r}{R_c(x)}$$

En appliquant les hypothèses introduites au paragraphe IV.2, on peut écrire les contraintes normales (longitudinales à l'axe) agissant dans chaque couche :

$$\sigma_{zz}^k(r) = E_k \varepsilon_{zz}(r)$$

En combinant les deux dernières équations, on déduit l'expression de la contrainte de flexion agissant dans la section du tube sur l'ensemble de sa longueur :

$$\sigma_{flex}(r,x) = \frac{E_k . r}{R_c(x)}$$

Au point de touche, le rayon de courbure est égal à a (voir équation [III-6), on en déduit la contrainte maximale due à la flexion dans une couche k donnée :

$$\sigma^k_{flex,\max} = \frac{E_k.r_k}{a} \qquad [\text{IV-6}]$$

Ecriture du critère

Par application du principe de superposition, la contrainte de Von Mises dans une couche k donnée s'écrit en combinant les contributions des efforts de flexion, de tension et de pression suivant la relation :

$$\sigma^k_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\left(\sigma^k_{zz} + \sigma^k_{flex,\max} - \sigma^k_{\theta\theta}\right)^2 + \left(\sigma^k_{zz} + \sigma^k_{flex,\max}\right)^2 + \left(\sigma^k_{\theta\theta}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad [\text{IV-7}]$$

avec

$$\sigma^k_{\theta\theta} = -\frac{E_k}{\overline{E}} \cdot \frac{\left(r_o + \bar{e}\right)p_e}{\bar{e}}$$

$$\sigma^k_{zz} = \frac{E_k}{\overline{E}} \cdot \frac{\left(a\overline{\rho}\bar{e}\left(2r_o + \bar{e}\right) - C_s H_o \rho_e \left(r_o + \bar{e}\right)^2\right)g}{\bar{e}\left(2r_o + \bar{e}\right)}$$

$$\sigma^k_{flex,\max} = \frac{E_k.r_k}{a}$$

Une combinaison de matériaux est acceptable si le critère de Von Mises est vérifié dans chaque couche k :

$$\sigma^k_{vm} \le C_r Y_k \qquad [\text{IV-8}]$$

IV.4.4 Etre stable dans l'eau

La condition de satisfaction de cette astreinte est tirée du paragraphe III.2.4.4. Appliquée au cas du multicouche, on sait qu'une combinaison de matériau est acceptable si :

$$\frac{\overline{\rho}\overline{S}}{\rho_e S_e} > 1{,}1 \qquad [\text{IV-9}]$$

IV.4.5 Résister à la rupture par flambage

Le flambement d'un tube multicouche sous l'action d'une pression extérieure uniforme a été étudié par Vinson [VIN99]. Les échanges avec l'auteur ont permis d'estimer la validité des approches disponibles à l'heure actuelle sur le sujet. D'après son expérience, il n'est pas possible, dans l'état actuel des connaissances, d'expliquer le phénomène de flambement avec la théorie des coques minces. Toujours d'après l'auteur, les campagnes d'essais doivent être menées pour recaler les modèles avec les résultats expérimentaux. Malgré ces incertitudes, nous poursuivrons l'étude avec les modèles de dimensionnement proposés par Peterson [PET68]. Ce sont des modèles analytiques qui permettront de donner une estimation préliminaire des solutions. Nous garderons toutefois à l'esprit que des campagnes d'essais devront venir valider la théorie.

Pour des cylindres longs, la pression critique de flambement est donnée par :

$$p_{cr} = \frac{3}{r^3}\left(\tilde{D} - \frac{\tilde{C}^2}{\tilde{E}}\right) \qquad \text{[IV-10]}$$

avec

$$\tilde{E} = \sum_n \frac{E_k e_k}{0{,}91}$$

$$\tilde{C} = \sum_n \frac{E_k e_k \tilde{e}_k}{0{,}91}$$

$$\tilde{D} = \sum_n \left(\frac{E_k}{0{,}91}\right) \cdot \left(\frac{e_k^3}{12} + e_k \tilde{e}_k^2\right)$$

$$\tilde{e}_k = \sum_{j=1}^{k} e_j - \frac{e_k}{2}$$

Le critère est établi en comparant la pression d'instabilité et la pression hydrostatique $p_e(z)$ auquel on applique un coefficient de sécurité C_f . Conformément aux spécifications techniques imposées par les normes de dimensionnement offshore en vigueur [DNV07], on prend C_f égal à 0,67.

On considère le cas le plus défavorable où la ligne est vide (pression interne de 1 bar) et où la profondeur est maximale. Une combinaison de matériau donnée est acceptable si la condition suivante est vérifiée :

$$p_{cr} \geq \frac{\rho_e g H_o}{C_f} \qquad \text{[IV-11]}$$

IV.4.6 Respecter l'encombrement imposé par le système de serrage

Le critère présenté au paragraphe III.2.4.6 est applicable dans le cas d'un multicouche car il exprime des restrictions géométriques imposées par le navire de pose.

Connaissant le diamètre intérieur d_o de la conduite imposé par le cahier des charges et le diamètre maximal admissible $d_{e\max}$ de 22 pouces, on déduit l'épaisseur maximale admissible de la paroi du tube multicouche e_{adm} :

$$e_{adm} = \frac{d_{e\max} - d_o}{2} \qquad [\text{IV-12}]$$

L'astreinte sur l'encombrement est satisfaite si la somme des épaisseurs de chaque couche, $\bar{e}$ ne dépasse pas l'épaisseur maximale admissible :

$$\bar{e} \le e_{adm} \qquad [\text{IV-13}]$$

IV.5 Conditions de satisfaction des astreintes en service

IV.5.1 Résister à la pression interne et externe

L'équilibre statique de la conduite étudié au paragraphe III.2.2.3 permet de déduire les efforts extérieurs. En coupant virtuellement la structure suivant les facettes perpendiculaires à l'axe et à la direction circonférentielle, on peut introduire les efforts internes à la structure. En supposant que les contraintes sont uniformes dans chacune des couches (hypothèses détaillées au paragraphe IV.2), on peut alors déduire les contraintes axiales et circonférentielles dans les couches.

L'équilibre suivant une facette perpendiculaire à la direction circonférentielle conduit à la contrainte circonférentielle dans une couche k donnée :

$$\sigma_{\theta\theta}^{k} = \frac{E_k}{\bar{E}} \cdot \frac{r_o p_i - \left(r_o + \bar{e}\right) p_e}{\bar{e}} \qquad [\text{IV-14}]$$

L'équilibre suivant une facette perpendiculaire à l'axe donne :

$$\sum_n \sigma_{zz}^{k} S_{zz}^{k} = T_{vraie}$$

La tension axiale T_{vraie} admet pour forme générale $T_{vraie} = T_{eff} - p_e S_e + p_i S_i$. La tension effective sur le fond marin étant négligeable, la tension axiale est donnée par :

$$T_{vraie} = p_i S_i - p_e S_e = \pi r_o^2 p_i - \pi\left(r_o + \bar{e}\right)^2 p_e$$

La contrainte axiale dans une couche k donnée est alors :

$$\sigma_{zz}^{k} = \frac{E_k}{\overline{E}} \cdot \frac{\left[r_o^2 p_i - \left(r_o + \bar{e} \right)^2 p_e \right]}{\bar{e}\left(2r_o + \bar{e} \right)} \qquad [\text{IV-15}]$$

Par application du principe de superposition, la contrainte de Von Mises dans une couche k donnée s'écrit en combinant les contributions des efforts de tension et de pression suivant la relation :

$$\sigma_{vm}^{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\left(\sigma_{zz}^{k} - \sigma_{\theta\theta}^{k} \right)^2 + \left(\sigma_{zz}^{k} \right)^2 + \left(\sigma_{\theta\theta}^{k} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \qquad [\text{IV-16}]$$

Par conséquent, une combinaison de k matériaux donnée est acceptable si :

$$\sigma_{vm}^{k} \leq C_r Y_k \qquad [\text{IV-17}]$$

IV.5.2 Limiter les pertes thermiques

L'analyse thermique proposée au paragraphe III.3.2 est applicable au problème multicouche. On montre que la définition du coefficient d'échange thermique globale d'une section de canalisation est l'inverse du produit de la section utile de fluide et de la somme des résistances thermiques des couches.

Le coefficient d'échange s'exprime sous la forme :

$$U = \left(r_o \sum_n \frac{1}{\lambda_k} Ln\left(\frac{r_k}{r_{k-1}} \right) \right)^{-1} \qquad [\text{IV-18}]$$

Connaissant la valeur du requis maximum admissible U_o caractérisant les pertes thermiques dans une section, le critère vient de façon immédiate et s'exprime par l'inéquation suivante :

$$U \leq U_o \qquad [\text{IV-19}]$$

V. PROGRAMME ECLIPSE POUR LE TRIMATERIAU

Seul le programme ECLiPSe pour la conception du multimatériau à trois couches est présenté.

```
%       CONCEPTION PRELIMINAIRE TrimatERIAU          sgi-08
% Note: ce fichier fait reference au tableau 4.9 du manuscrit
% 1_APPEL DES LIBRAIRIES NECESSAIRES A LA RESOLUTION DU PSC
:- lib(ic).
:- lib(ic_global).
% 2_DEFINITION DES PROCEDURES D'INSTANCIATION INDEXEE DES PROPRIETES MATERIAU SUR LEUR DOMAINE
DE VARIATION RESPECTIF
% RHO [kg/m3] - Y [chgt var] - E [chgt var] - NU [chgt var] - C [m€/kg] - RE [s.u.] - TMAX [K]
- TMIN [K].
mat1(I1, RHO1, Y1, L1, E1, NU1, C1, SW1, TMAX1, TMIN1, RA1, RU1) :-
mat2(I2, RHO2, Y2, L2, E2, NU2, C2, SW2, TMAX2, TMIN2, RA2, RU2) :-
mat3(I3, RHO3, Y3, L3, E3, NU3, C3, SW3, TMAX3, TMIN3, RA3, RU3) :-
% note : pour chaque procedure mat1, mat2, mat3, reprendre le format donné en annexe II)
% 3_ECRITURE DU PROBLEME trimat SOUS FORME CSP
       trimat(I1, RHO1, Y1, L1, E1, NU1, C1, RE1, TMAX1, TMIN1, RA1, RU1, I2, RHO2, Y2, L2,
E2, NU2, C2, RE2, TMAX2, TMIN2, RA2, RU2, I3, RHO3, Y3, L3, E3, NU3, C3, RE3, TMAX3, TMIN3,
RA3, RU3, N1, N2, N3, C):-
%*************************************************************************
%***Definition des variables de conception et de leur domaine de variation
%*************************************************************************
       mat1(I1, RHO1, Y1, L1, E1, NU1, C1, RE1, TMAX1, TMIN1, RA1, RU1),
       mat2(I2, RHO2, Y2, L2, E2, NU2, C2, RE2, TMAX2, TMIN2, RA2, RU2),
       mat3(I3, RHO3, Y3, L3, E3, NU3, C3, RE3, TMAX3, TMIN3, RA3, RU3),
% coefficient du coefficient de transfert thermique (sans convection) [W.m-2.K-1]
       U0 $= 0.7,
% températures maximale et minimale de service [°C]
       TMAX0 $= 90,
       TMIN0 $= -10,
% pression interne d'installation et Pression interne de service [Pa]
       Pii0 $= 100000,
       Pis0 $= 35000000,
% tension dynamique en tête [kN]
       Ttmax #= 7500,
% diamètre interne [pouces]
       Di $= 12,
% profondeur imposée [m]
       H0 #= 2000,
% diamètre maximum [pouces]
       Dem $= 22,
% épaisseur de paroi [mm]
       N1 #:: [1..25],
       N2 #:: [1..25],
       N3 #:: [1..25],
       EpC1 $= 5*N1,
       EpC2 $= 5*N2,
       EpC3 $= 5*N3,
```

```
       Ep $= EpC1+EpC2+EpC3,
% masse volumique eau de mer [kg/m3]
       RHOeau $= 1025,
% Constantes
       %pi
       PI $= 3.14159265,
       %conversion inch-mm
       IMM $= 25.4,
       % Cd : DAF coefficient d'amplification dynamique, Cc coefficient statique
       Cd $= 1.15,
       Cc $= 1.12,
       % coefficient de securité, Cr en resistance et Cf en flambage
       Cr $= 0.7,
       Cf $= 0.67,
% Changement d'échelle pour les variables pour que leur domaine de variation soit constitué
d'entiers E*_ [Pa] - Y*_ [Pa] - Dimensions [m]
       E1_ $= exp(E1/100),
       Y1_ $= exp(Y1/100),
       NU1_ $= NU1/1000,
       E2_ $= exp(E2/100),
       Y2_ $= exp(Y2/100),
       NU2_ $= NU2/1000,
       E3_ $= exp(E3/100),
       Y3_ $= exp(Y3/100),
       NU3_ $= NU3/1000,
       Di0 $= Di*IMM/1000,
       Demax $= Dem*IMM/1000,
       EEQ $= E1_*V_11+E2_*V_22+E3_*(1-V_11-V_22),
       RHOEQ $= RHO1*V_11+RHO2*V_22+RHO3*(1-V_11-V_22),
       R0 $= Di*IMM/2,       % rayon interne C1 en [mm]
       R1 $= R0+EpC1,        % rayon interne C2 en [mm]
       R2 $= R1+EpC2,        % rayon interne C3 en [mm]
       R3 $= R2+EpC3,        % rayon externe C3 en [mm]
       Pe $= RHOeau*10*H0,   % Pression hydrostatique en [Pa]
       A $= H0*(Cc-1),              % rayon courbure au point de touche en [m]
       S_ $= PI*Ep*(2*R0+Ep),% surface de la section transversale du mmtx en [mm2]
       Se $= PI*(R0+Ep)^2,   % surface totale exterieure de la conduite en [mm2]
       V_11 $= (Di*IMM+EpC1)*EpC1/((Di*IMM+Ep)*Ep),
       V_22 $= (Di*IMM+2*EpC1+EpC2)*EpC2/((Di*IMM+Ep)*Ep),
       V_33 $= 1-V_11-V_22,
%*************************************************************************************************
%********Definition des Variables critères  ****************
%*************************************************************************************************
% Astreinte 01 : Résister à la température de l'effluent (min)
              TMIN $= TMIN0+273,
% Astreinte 02 : Résister à la température de l'effluent (max)
              TMAX $= TMAX0+273,
% Astreinte 03 : Résister aux agressions chimiques de l'effluent
              %ecriture directe en contrainte
% Astreinte 04 : Résister aux agressions chimiques du milieu marin
              %ecriture directe en contrainte
```

```
% Astreinte 05 : Résister au frottement du fond
              %ecriture directe en contrainte
% Astreinte 06 : Résister à la tension en tete // S06X en [Pa]
              %calcul des contraintes longidinales
                     S061 $= E1_*Cd*Cc*H0*10*(RHOEQ-RHOeau)/EEQ,
                     S062 $= E2_*Cd*Cc*H0*10*(RHOEQ-RHOeau)/EEQ,
                     S063 $= E3_*Cd*Cc*H0*10*(RHOEQ-RHOeau)/EEQ,
              %définition critère
                     R061 $= Cr*Y1_/S061,
                     R062 $= Cr*Y2_/S062,
                     R063 $= Cr*Y3_/S063,
% Astreinte 07: Resister a la pression et la flexion au point de touche
       % contrainte circonferentielle couche k (1..3)      en [Pa]
              Stt07 $= (-1)*(R0+Ep)*Pe/(EEQ*Ep),
              Stt071 $= E1_*Stt07,
              Stt072 $= E2_*Stt07,
              Stt073 $= E3_*Stt07,
              % contrainte longitudinale couche k (1..3)
              Szz07 $= (10*A*RHOEQ*S_-Pe*Se)/(EEQ*S_),
              Szz071 $= E1_*Szz07,
              Szz072 $= E2_*Szz07,
              Szz073 $= E3_*Szz07,
              % contrainte flexion couche k (1..3)
              Sf071 $= E1_*R1/1000/A,
              Sf072 $= E2_*R2/1000/A,
              Sf073 $= E3_*R3/1000/A,
              % contrainte de Von Mises couche k (1..3)
              Svm071 $= (0.5*((Szz071+Sf071-Stt071)^2+(Szz071+Sf071)^2+Stt071^2))^(0.5),
              Svm072 $= (0.5*((Szz072+Sf072-Stt072)^2+(Szz072+Sf072)^2+Stt072^2))^(0.5),
              Svm073 $= (0.5*((Szz073+Sf073-Stt073)^2+(Szz073+Sf073)^2+Stt073^2))^(0.5),
              % définition critère
              R071 $= Cr*Y1_/Svm071,
              R072 $= Cr*Y2_/Svm072,
              R073 $= Cr*Y3_/Svm073,
%   Astreinte 08 : Resister au flambage
       EEpC1 $= EpC1/2,
       EEpC2 $= EpC1+EpC2/2,
       EEpC3 $= Ep-EpC3/2,
       EE $= (E1_*EpC1+E2_*EpC2+E3_*EpC3)/0.91, % en Pa.mm
       CC $= (E1_*EpC1*EEpC1+E2_*EpC2*EEpC2+E3_*EpC3*EEpC3)/0.91, en Pa.mm2
       DD$=E1_*(EpC1^3/12+EpC1*EEpC1^2)+E2_*(EpC2^3/12+EpC2*EEpC2^2)+
                                    +E3_*(EpC3^3/12+EpC3*EEpC3^2))/0.91, % en Pa.mm3
       Pcr $= 3*(DD-CC^2/EE)/R0^3,   % en Pa
       % définition critère
       R08 $= Pcr*Cf/Pe,
%  Astreinte 09 : Résister aux pressions interne et externe (service)
       %calcul des contraintes circonferentielles
       Stt09 $= (R0*Pis0-(R0+Ep)*Pe)/(EEeq*Ep),
       Stt091 $= E1_*Stt09,
       Stt092 $= E2_*Stt09,
       Stt093 $= E3_*Stt09,
```

```
        %calcul des contraintes longitudinales
        Szz09 $= (R0^2*Pis0-(R0+Ep)^2*Pe)/(EEeq*Ep*(2*R0+Ep)),
        Szz091 $= E1_*Szz09,
        Szz092 $= E2_*Szz09,
        Szz093 $= E3_*Szz09,
        %calcul des contraintes de Von Mises
        Svm091 $= (0.5*((Szz091-Stt091)^2+Szz091^2+Stt091^2))^(0.5),
        Svm092 $= (0.5*((Szz092-Stt092)^2+Szz092^2+Stt092^2))^(0.5),
        Svm093 $= (0.5*((Szz093-Stt093)^2+Szz093^2+Stt093^2))^(0.5),
        % définition critère
        R091 $= Cr*Y1_/Svm091,
        R092 $= Cr*Y2_/Svm092,
        R093 $= Cr*Y3_/Svm093,
%  Astreinte 10 : isolation thermique
        U $= 1000/(R0*ln(R1/R0)/(L1/1000)+R0*ln(R2/R1)/(L2/1000)+R0*ln(R3/R2)/(L3/1000)),
                % définition critère
                        R10 $= U0/U,
%  Astreinte 11 : Etre non flottant dans l'eau
                Flott $= (RHOEQ*S_)/(RHOeau*Se),
                % définition critère
                        R11 $= Flott/1.1,
%  Astreinte 12 : Ne pas dépasser la tension maximale admissible
                % calcul du poids de la ligne dans l'eau pleine d'eau en [N]
                Mtot $= Cd*Cc*H0*(RHOEQ-RHOeau)*S_/100000,
                % définition critère
                        R12 $= (Ttmax*1000)/Mtot,
%  astreinte 13: encombrement
                %ecriture directe en contrainte
%*****************************************************************************************
%*************  Ecriture de fonction performance  ************************
%*****************************************************************************************
% C matière Cm (Cm1 C matière couche 1, Cm2 C matière couche 2) [€/m]
                CC1 $= PI*C1*RHO1*(R1^2-R0^2)/1000,
                CC2 $= PI*C2*RHO2*(R2^2-R1^2)/1000,
                CC3 $= PI*C3*RHO3*(R3^2-R2^2)/1000,
                C $= CC1+CC2+CC3,
%*****************************************************************************************
%*********************************  Ecriture des contraintes  ********************
%*****************************************************************************************
%  astreinte 01 et 02 : Temperature min et max tenue à la température (C1, C2 et C3)
                TMAX1 $>= TMAX,
                TMIN1 $=< TMIN,
                TMAX2 $>= TMAX,
                TMIN2 $=< TMIN,
                TMAX3 $>= TMAX,
                TMIN3 $=< TMIN,
%  astreinte 03 : Résistance aux acides (C1)                                          %ok
                RA1 $>= 3,
%  astreinte 04: Résistance corrosion eau de mer (C3)                                 %ok
                RE3 $>= 5,
%  astreinte 05: Résistance à l'abrasion (C3)                                         %ok
```

```
              RU3 $>= 3,
%  Astreinte 06 : Résister à la tension en tete
              R061 $> 1,
              R062 $> 1,
              R063 $> 1,
%  Astreinte 07: Resister a la pression et la flexion au point de touche
              R071 $> 1,
              R072 $> 1,
              R073 $> 1,
%   Astreinte 08 : Resister au flambage
              R08  $> 1,
%   Astreinte 09 : Résister aux pressions interne et externe (service)
              R091 $> 1,
              R092 $> 1,
              R093 $> 1,
%  Astreinte 10 : isolation thermique
              R10 $> 1,
%  Astreinte 11 : Etre non flottant dans l'eau
              R11  $> 1,
%  Astreinte 12 : Ne pas dépasser la tension maximale admissible
              R12  $> 1,
%  astreinte 13: encombrement
              Ep $< 127,
%Contrainte supplementaire technique pour ecarter solutions redondantes bimateriau
              I2 $\= I1,
              I2 $\= I3.
%*************************************************************************************************
%*********************************  Resolution du problème  ******************************
%*************************************************************************************************
solve(I1, RHO1, Y1, L1, E1, NU1, C1, RE1, TMAX1, TMIN1, RA1, RU1, I2, RHO2, Y2, L2, E2, NU2,
C2, RE2, TMAX2, TMIN2, RA2, RU2, I3, RHO3, Y3, L3, E3, NU3, C3, RE3, TMAX3, TMIN3, RA3, RU3,
N1, N2, N3, C):-
       trimat(I1, RHO1, Y1, L1, E1, NU1, C1, RE1, TMAX1, TMIN1, RA1, RU1, I2, RHO2, Y2, L2,
E2, NU2, C2, RE2, TMAX2, TMIN2, RA2, RU2, I3, RHO3, Y3, L3, E3, NU3, C3, RE3, TMAX3, TMIN3,
RA3, RU3, N1, N2, N3, C),
       labeling([I1, RHO1, Y1, L1, E1, NU1, C1, RE1, TMAX1, TMIN1, RA1, RU1, I2, RHO2, Y2, L2,
E2, NU2, C2, RE2, TMAX2, TMIN2, RA2, RU2, I3, RHO3, Y3, L3, E3, NU3, C3, RE3, TMAX3, TMIN3,
RA3, RU3, N1, N2, N3]).
out:-
       open("output.txt", write, fichier),
       (writeln(fichier, [I1, I2, I3, N1, N2, N3, C]),
       solve(I1, RHO1, Y1, L1, E1, NU1, C1, RE1, TMAX1, TMIN1, RA1, RU1, I2, RHO2, Y2, L2, E2,
NU2, C2, RE2, TMAX2, TMIN2, RA2, RU2, I3, RHO3, Y3, L3, E3, NU3, C3, RE3, TMAX3, TMIN3, RA3,
RU3, N1, N2, N3, C),
       writeln(fichier, [I1, I2, I3, N1, N2, N3, C]),
       fail;close(fichier)).
%*************************************************************************************************
%************************************  Fin de fichier
%*************************************************************************************************
```