



Conception des Moyens d'Expérimentation. Approche de Cohérence en Coût - Performance

Thi Hồng Liên Luong

► To cite this version:

Thi Hồng Liên Luong. Conception des Moyens d'Expérimentation. Approche de Cohérence en Coût - Performance. Sciences de l'Homme et Société. Arts et Métiers ParisTech, 2005. Français. NNT : 2005ENAM0016 . pastel-00001393

HAL Id: pastel-00001393

<https://pastel.hal.science/pastel-00001393>

Submitted on 10 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Centre de Paris

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de

L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS ET MÉTIERS

Spécialité : Génie Industriel

par

Thi Hồng Liên LUONG

CONCEPTION DES MOYENS D'EXPERIMENTATION

APPROCHE DE COHERENCE EN COUT - PERFORMANCE

sera soutenue le 16 septembre 2005 devant le jury composé de

M.	A.	AOUSSAT	Professeur à l'ENSAM, Paris	Directeur de thèse
	P.	DUBOIS	Maître de Conférences à l'ENSAM, Paris	Codirecteur de thèse
	P.	MARTIN	Professeur à l'ENSAM, Metz	Examineur
	S.	TICHKIEWITCH	Professeur à INPG, Grenoble	Rapporteur
	P.	THEVENET	Ingénieur de Recherche à EADS-CCR, Suresnes	Invité
	P.	TRUCHOT	Professeur à l'ENSGSI, Nancy	Rapporteur

L'ENSAM est un Grand Etablissement dépendant du Ministère de l'Education Nationale, composé de huit centres :

AIX-EN-PROVENCE ANGERS BORDEAUX CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE CLUNY LILLE METZ PARIS

A mes enfants : Cuong, Nicolas et Camille

Qui sont nés et grandis avec ce travail ;

A mes parents et à mon chéri

Un grand merci...

REMERCIEMENTS

Je voudrait avant tout remercier Monsieur Améziane AOUSSAT, Professeur des Universités et Directeur du laboratoire de Conception de Produits et Innovation de l'ENSAM pour le site de Paris, pour son rôle en tant que directeur de thèse et ses conseils précieux lors de la phase de rédaction de ce document.

Je remercie également Monsieur Patrice DUBOIS, Maître de Conférences au Laboratoire de Conception de Produits et Innovation, pour ses conseils en tant que Codirecteur de thèse pendant ces trois dernières années. Merci pour les discussions très animées et ton énergie inépuisable.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Serge TICHKIEWITCH, Professeur des Universités à l'INPG et Monsieur Patrick TRUCHOT, Professeur des Universités à l'ENSGSI pour avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs ainsi que Monsieur Patrick MARTIN, Professeur des Universités de l'ENSAM – Metz pour avoir accepté d'être membre du jury respectivement en tant qu'examinateur.

Je tiens à remercier Monsieur Pascal THEVENET, Ingénieur de Recherche au Centre Commun de Recherche de l'EADS, pour m'avoir fait confiance au cours du projet de banc d'essai de « délaminage en mode I à grande vitesse » et pour avoir accepté d'être membre invité du jury de thèse.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Philippe PLANARD, Ingénieur de Recherche à l'ENSAM – Paris, sans qui ce travail n'aurait pas pu être réalisé. Merci pour la confiance que tu m'a témoigné à travers les études de développement des MES que tu m'avais confié. Notre passion pour la technologie nous a réuni et nous anime au quotidien.

Je n'oublie pas de remercier l'équipe du service prototypes qui m'a accueilli pendant trois ans en tant que responsable de bureau d'études. C'est une période riche en expériences technologiques et humaines qui m'a servi à la réalisation des expérimentations dans le cadre de ce travail.

Un très grand merci aux membres du Groupe de Travail de Thèse. Je ne suis pas très sûre si il s'agit du GTT N°4 ou N°3, mais ce dont je suis sûre c'est que vos remarques constructives m'ont beaucoup aidée.

Remerciements sincères à José LATUFF. Merci pour tes conseils et ton soutien moral dans les périodes critiques. La compréhension et la générosité sont tes grandes qualités que j'ai beaucoup appréciées.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du laboratoire de Conception de Produits et Innovation pour une ambiance de travail à la fois conviviale et dynamique.

Un grand merci à mon beau père, qui a le courage de lire et de corriger les fautes d'orthographe et grammaires de ce document. Sans vous, ce document n'aurait pas été lisible.

Un très grand merci, aussi et surtout à ma famille, à mon chéri qui a du me supporté durant tous ces années, à mes parents pour leur soutien moral très important et à mes enfants, mes joies de vive.

Encore une fois, je remercie profondément toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenus pendant cette période très importante de ma vie. Je m'incline devant vous pour vous saluer et vous honorer.

TABLE DES MATIÈRES

[Introduction générale17](#)

[1 Positionnement de notre étude.17](#)

[2 Expérimentation – quelques définitions17](#)

[3 Définition du moyen d'expérimentation.19](#)

[4 Périmètre de notre étude20](#)

[5 Objectif de la thèse21](#)

[6 Enjeu économique de notre étude21](#)

[7 Structure du document.22](#)

[CONTEXTE et Problématique de notre recherche23](#)

[INTRODUCTION – STRUCTURE DE LA PARTIE23](#)

[CONTEXTE DE NOTRE ETUDE24](#)

[1 Recherche et développement24](#)

[1.1 Quelques définitions24](#)

[1.2 Processus de la recherche et développement25](#)

[2 Positionnement de l'expérimentation et du ME dans la recherche et le développement26](#)

[2.1 Expérimentation dans la recherche et le développement.26](#)

[2.2 Positionnement des ME dans le processus de la recherche et développement.29](#)

[3 Typologie de l'expérimentation et du moyen d'expérimentation30](#)

[3.1 Typologie de l'expérimentation30](#)

[3.2 Typologie des ME32](#)

[4 Caractéristiques du MES32](#)

[5 Conclusion36](#)

[ETAT DE L'ART SUR LE DEVELOPPEMENT DES MOYENS
D'EXPERIMENTATION37](#)

[1 Introduction37](#)

2 Enquête sur le développement et l'utilisation de ME37

2.1 Objectifs de l'enquête38

2.2 Résultats de l'enquête38

2.2.1 Développement des ME39

2.2.2 Acquisition et exploitation des ME41

2.2.3 Analyse des attentes des chercheurs et des concepteurs44

2.3 Remarque sur les résultats de l'enquête45

3 Analyse des projets de développement des MES46

3.1 Analyse documentaire sur le développement des MES46

3.2 Analyse des projets concrets de conception des MES48

3.2.1 Projet « machines de flambement des plaques sandwich »49

3.2.2 Projet banc d'essais de flambement avec frottement conditionné de poutres composites.52

3.2.3 Micro-platine de traction.57

3.3 Synthèse des expériences acquises sur la conception des MES.61

4 Conclusion – problématique de terrain expérimental64

4.1 Contexte de développement des MES64

4.2 Problèmes constatés64

4.2.1 Décalage par rapport au besoin expérimental64

4.2.2 Non-optimisation en « coût, qualité, délai »65

4.3 Manque de méthodes de conception adaptées66

4.3.1 Besoin d'une méthode de conception pour les MES66

4.3.2 Objectifs visés d'une méthode de conception des MES66

4.4 Problématique du terrain expérimental67

CADRE THEORIQUE DE REFERENCE - PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE67

1 Démarches de l'expérimentation69

1.1	Démarches expérimentales pour la recherche	69
1.2	La démarche des plans d'expériences	70
1.3	Synthèse des démarches de l'expérimentation	72
1.4	Remarque	74
2	Processus de conception de produits	75
2.1	Approche algorithmique dans la modélisation du processus de conception	75
2.2	Approche axiomatique dans la modélisation du processus de conception	78
2.3	Approche intégrée dans la modélisation du processus de conception	80
2.4	Remarques	81
3	Cadre de référence de notre recherche méthodologique	84
3.1	Niveaux d'intervention des outils méthodologiques en conception	85
3.2	Typologie des méthodes de conception	87
3.3	Typologie des outils d'aide à la conception	87
3.4	Outils méthodologiques pour la conception des systèmes	90
3.5	Synthèse des références méthodologiques en conception de produit	92
4	Analyse de la Valeur – Analyse Fonctionnelle dans la conception des MES	92
4.1	Principe de l'Analyse de la Valeur – Analyse Fonctionnelle	93
4.2	Expression du besoin d'expérimentation	95
4.2.1	Analyse Fonctionnelle du besoin	95
4.2.2	Quality Function deployment (QFD)	97
4.2.3	Stratégie d'Elaboration et de Maîtrise du Cahier Des Charges	98
4.3	Répartition du coût et des performances dans la structure de MES	98
4.4	Prendre en compte le contexte de développement et les caractères spécifiques des MES	101
5	Conclusion - Problématique de notre recherche	101
	Hypothèses - premier modèle de la démarche	102

INTRODUCTION – HYPOTHESE DE BASE102

ANALYSE DE L'EXPERIMENTATION ORIENTEE FONCTIONNELLE103

1 Introduction – Première sous - hypothèse103

2 Principe de l'analyse.104

3 Mode d'emploi de l'ANEXOF106

3.1 Formalisation du problème106

3.1.1 Identification du besoin d'expérimentation.107

3.1.2 Définition du but de l'étude et des objectifs à atteindre107

3.1.3 Définition des moyens nécessaires108

3.1.4 Définition de l'interface entre le système à étudier et son milieu extérieur108

3.2 Définition du modèle expérimental109

3.2.1 Analyse des flux d'entrée et de sortie109

3.2.2 Identification des facteurs perturbateurs du phénomène à étudier111

3.2.3 Construction du modèle expérimental.113

3.3 Elaboration du cahier des charges fonctionnel114

3.3.1 Identification des fonctions de service principales114

3.3.2 Définition d'autres fonctions de MES.115

3.3.3 Caractérisation des fonctions.116

4 Remarque.117

ANALYSE DE LA COHERENCE EN COUT – PERFORMANCE118

1 Introduction – Deuxième sous – hypothèse118

2 Evaluation de la cohérence en coût – performance120

2.1.1 Performance.120

2.1.2 Cohérence.121

2.1.3 Evaluation de la Cohérence en performance121

[2.1.4 Cohérence en coût - performance122](#)

[3 Principe de l'Analyse de la Cohérence en Coût - Performance123](#)

[3.1 Cohérence approximative – phase descendante de l'ACCP124](#)

[3.1.1 Analyse des corrélations entre les critères d'appréciation125](#)

[3.1.2 Équilibrage des critères d'appréciation126](#)

[3.2 Cohérence affinée – phase ascendante de l'ACCP129](#)

[4 Remarque.130](#)

[DEMARCHE DE LA CONCEPTION DES MOYENS D'EXPERIMENTATION –
PREMIER MODELE131](#)

[1 Structure de la démarche131](#)

[2 Pilotage du projet133](#)

[3 Conclusion135](#)

[Expérimentation de la démarche136](#)

[INTRODUCTION – DEUX SERIES D'EXPERIMENTATION136](#)

[PREMIERE SERIE D'EXPERIMENTATION136](#)

[1 Introduction – Objectif136](#)

[2 Validation de l'ANEXOF137](#)

[2.1 Projet de caractérisation dynamique et d'optimisation du procédé de Collage hors
plan des structures composite.137](#)

[2.1.1 Formalisation du problème138](#)

[2.1.2 Définition du modèle expérimental143](#)

[2.1.3 Elaboration du cahier des charges fonctionnelle147](#)

[2.2 Remarque151](#)

[3 Validation de l'ACCP151](#)

[3.1 Projet Maîtrise et Asservissement du CHAriot \(MACHA\)151](#)

[3.1.1 Contexte de l'étude151](#)

[3.1.2 Cohérence approximative – phase descendante de l’ACCP153](#)

[3.1.3 Cohérence affinée – phase ascendante de l’ACCP159](#)

[3.2 Remarque160](#)

[4 Synthèse de la première série d’expérimentation160](#)

[4.1 Validation de la première sous hypothèse - ANEXOF160](#)

[4.2 Validation de la deuxième sous hypothèse - ACCP161](#)

[DEUXIEME SERIE D’EXPERIMENTATIONS161](#)

[1 Introduction161](#)

[2 Projet banc d'essais en fatigue des endoprothèses aortiques fabriquées sur mesure162](#)

[2.1 Contexte – Besoin en expérimentation162](#)

[2.2 ANEXOF163](#)

[2.2.1 Formalisation du problème163](#)

[2.2.2 Définition du modèle expérimental166](#)

[2.2.3 Elaboration du CdCf171](#)

[2.3 Conception du banc173](#)

[2.3.1 Recherche des solutions174](#)

[2.3.2 Définition préliminaire177](#)

[2.3.3 Définition détaillée182](#)

[2.4 Rédaction des documents182](#)

[2.5 Remarque183](#)

[3 Synthèse de la deuxième série d’expérimentations184](#)

[RETOURS D’EXPERIENCES – DEUXIEME MODELE DE LA DEMARCHE184](#)

[1 Retours d’expériences.185](#)

[2 Deuxième modèle de la démarche.185](#)

[Conclusion générale188](#)

1 Apports de la thèse188

1.1 Révéler la problématique du développement des MES189

1.2 Proposition d'une démarche de conception dédiée au développement des MES189

1.3 Développement d'un outil méthodologique qui relie les connaissances scientifiques et technologiques au service du développement des MES190

1.4 Développement d'un outil d'optimisation de la performance et du coût dans la conception des MES191

2 Limite de notre étude191

3 Perspectives192

Bibliographie193

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure	Page
<u>Fig.0. Les trois pôles du Génie Industriel</u>	<u>17</u>
<u>Fig.1. La boîte noire de l'expérimentation</u>	<u>18</u>
<u>Fig.2. Trois activités du processus de la recherche et développement</u>	<u>25</u>
<u>Fig.3. Processus d'acquisition de connaissances</u>	<u>28</u>
<u>Fig.4. La position de ME dans le processus de la recherche et développement</u>	<u>29</u>
<u>Fig.5. Modélisation d'un système</u>	<u>33</u>
<u>Fig.6. La « bête à cornes » du MES</u>	<u>34</u>
<u>Fig.7. Changement d'états du MES et de la machine spéciale</u>	<u>35</u>
<u>Fig.8. Processus de développement des MES</u>	<u>47</u>
<u>Fig.9. Modèle théorique</u>	<u>50</u>
<u>Fig.10. Modèles expérimentaux</u>	<u>50</u>
<u>Fig.11. Modèle expérimental retenu</u>	<u>51</u>
<u>Fig.12. Principe du banc d'essai</u>	<u>53</u>
<u>Fig.13. Principe de la machine</u>	<u>59</u>
<u>Fig.14. La démarche expérimentale [LEGENDRE 97]</u>	<u>72</u>
<u>Fig.15. Méthode de conception de produit [VADCARD 96]</u>	<u>76</u>
<u>Fig.16. Conception de produits selon l'approche axiomatique de SUH</u>	<u>79</u>
<u>Fig.17. La conception de produits [AOUSSAT 95]</u>	<u>80</u>
<u>Fig.18. Operations Managements Issues in Concurrent Engineering [LOCH 99]</u>	<u>82</u>
<u>Fig.19. La démarche de conception « CPN »</u>	<u>83</u>
<u>Fig.20. Taxinomie des éléments méthodologiques en conception de produit</u>	<u>85</u>
<u>Fig.21. Sept familles d'outils de conception</u>	<u>87</u>
<u>Fig.22. Extraire du diagramme FAST de l'aspirateur</u>	<u>99</u>

<u>Fig.23.</u>	<u>Méthode d'analyse de l'expérimentation orientée fonctionnelle (ANEXOF).</u>	<u>105</u>
<u>Fig.24.</u>	<u>Limite de l'étude.</u>	<u>108</u>
<u>Fig.25.</u>	<u>La boîte noire de l'expérimentation.</u>	<u>109</u>
<u>Fig.26.</u>	<u>Graphe des interactions.</u>	<u>111</u>
<u>Fig.27.</u>	<u>Graphe fonctionnel</u>	<u>114</u>
<u>Fig.28.</u>	<u>La « pieuvre » de MES.</u>	<u>115</u>
<u>Fig.29.</u>	<u>Le processus de l'ACCP.</u>	<u>123</u>
<u>Fig.30.</u>	<u>Extrait de l'arbre fonctionnel</u>	<u>124</u>
<u>Fig.31.</u>	<u>Les corrélations entre les critères d'appréciation de la fonction mère et des fonctions filles.</u>	<u>125</u>
<u>Fig.32.</u>	<u>La valeur optimale de la Performance</u>	<u>127</u>
<u>Fig.33.</u>	<u>Le courbe coût – performance estimé.</u>	<u>127</u>
<u>Fig.34.</u>	<u>Equilibrage les performances élémentaires</u>	<u>128</u>
<u>Fig.35.</u>	<u>Le basculement d'une sous solution à une autre.</u>	<u>129</u>
<u>Fig.36.</u>	<u>Démarche de conception des Moyens d'Expérimentation Spécifique.</u>	<u>131</u>
<u>Fig.37.</u>	<u>Critère d'assemblage collé.</u>	<u>139</u>
<u>Fig.38.</u>	<u>Montage Arcan</u>	<u>140</u>
<u>Fig.39.</u>	<u>Machine de traction à grande vitesse.</u>	<u>141</u>
<u>Fig.40.</u>	<u>Dimension de l'éprouvette.</u>	<u>142</u>
<u>Fig.41.</u>	<u>Eprouvette collée sur les mors.</u>	<u>143</u>
<u>Fig.42.</u>	<u>Les modes de sollicitation des essais ARCAN.</u>	<u>143</u>
<u>Fig.43.</u>	<u>La boîte noire de l'expérimentation.</u>	<u>144</u>
<u>Fig.44.</u>	<u>Modèle expérimental réel.</u>	<u>145</u>
<u>Fig.45.</u>	<u>Positionnement de MES dans le modèle expérimental</u>	<u>147</u>
<u>Fig.46.</u>	<u>La pieuvre de MES</u>	<u>148</u>
<u>Fig.47.</u>	<u>Cinématique de la machine MACHA</u>	<u>153</u>

<u>Fig.48. Niveau 1 de l'arbre fonctionnel.</u>	<u>153</u>
<u>Fig.49. Relations Critères – Performances du niveau 1</u>	<u>155</u>
<u>Fig.50. Niveau 2 de l'arbre fonctionnel.</u>	<u>157</u>
<u>Fig.51. Niveau 3 de l'arbre fonctionnel.</u>	<u>158</u>
<u>Fig.52. Anévrisme AAA et « mise à-plat greffe » de l'anévrisme</u>	<u>162</u>
<u>Fig.53. Pose de l'endoprothèse</u>	<u>162</u>
<u>Fig.54. Endoprothèse « sure mesure »</u>	<u>163</u>
<u>Fig.55. Endoprothèse avec et sans membrane</u>	<u>165</u>
<u>Fig.56. Endoprothèse en place – Déformation angulaire α.</u>	<u>167</u>
<u>Fig.57. Modèle d'essais</u>	<u>168</u>
<u>Fig.58. La boîte noire de l'expérimentation.</u>	<u>169</u>
<u>Fig.59. Modèle d'expérimentation des endoprothèses en fatigue.</u>	<u>170</u>
<u>Fig.60. Positionnement du MES dans le modèle d'expérimentation.</u>	<u>171</u>
<u>Fig.61. Arbre fonctionnel pour F₂</u>	<u>174</u>
<u>Fig.62. Schéma cinématique du banc d'essais.</u>	<u>176</u>
<u>Fig.63. Arbre fonctionnel de la F₁</u>	<u>177</u>
<u>Fig.64. Arbre fonctionnel de la F₂₄</u>	<u>179</u>
<u>Fig.65. deux cinématiques du système bielle – manivelle.</u>	<u>181</u>
<u>Fig.66. banc d'essai version II</u>	<u>183</u>
<u>Fig.67. Premier modèle de la démarche de conception des MES.</u>	<u>185</u>
<u>Fig.68. Deuxième modèle de la démarche de conception des MES.</u>	<u>187</u>

Tableaux

pages

<u>Tableau 1. Les sept étapes de la mise en œuvre des plans d'expériences [PILLET 94].</u>	<u>71</u>
<u>Tableau 2. Comparaison des démarches d'expérimentation.</u>	<u>73</u>

[Tableau 3. Principaux outils d'analyse des systèmes dans une démarche de conception \[TEIXIDO 98\].92](#)

[Tableau 4. L'action Analyse de la Valeur : les acteurs et les outils associés95](#)

[Tableau 5. Démarche de développement des MES et les outils associés.134](#)

[Tableau 6. Programmes de l'Expérimentation et du développement des MES135](#)

[Tableau 7. Récapitulation des projets de validation d'ANEXOF.137](#)

[Tableau 8. Récapitulation des fonctions principales du MES.151](#)

[Tableau 9. Relations Critères – Performances du niveau 1156](#)

[Tableau 10. Relations Critères – Performances du niveau 2158](#)

[Tableau 11. Relations Critères – Performances du niveau 3159](#)

[Tableau 12. Récapitulation des fonctions principales du banc d'essais des endoprothèses sur mesure en fatigue.173](#)

[Tableau 13. Relations C – P du premier niveau de l'arbre fonctionnel de la fonction F₂₄.181](#)

LEXIQUE

Equipement. Fourniture ayant une individualité fonctionnelle et des limites physiques précises dans l'ouvrage. Il fait l'objet d'une spécification qui donne les caractéristiques et performances à réaliser et les contraintes à respecter par le constructeur.

Moyen. Elément actif utilisé pour la réalisation d'une action, il comprend : l'acteur : personne physique, groupe de personnes ou personne morale ; l'agent : outil, instrument, matériel, progiciel, équipements.

ME. Moyen d'Expérimentation est un matériel, qui sert à réaliser une ou plusieurs expériences.

MES Moyens d'Expérimentation Spécifique et Mixte.

Etude préliminaire. A partir des conclusions des études préalables ou des éléments reçus du maître d'ouvrage, l'étude préliminaire permet de définir les données générales de base des ouvrages et/ou équipements et/ou des ensemble industriels.

Le composite. Dans sa définition la plus large, un matériau composite est constitué par une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue est généralement rigide et résistante, elle constitue le *Renfort*. La phase continue assure la cohésion et la protection des phases discontinues, on la nomme *Matrice*.

Introduction générale

1 Positionnement de notre étude.

Sciences économiques

Sciences sociales

Génie Industriel

Sciences pour l'ingénieur

Nos travaux de thèse se situent dans le domaine du génie industriel. C'est un croisement de trois pôles : Sciences de l'ingénieur, Sciences économiques et sciences sociales (Fig. 0). « Elle rassemble un grand nombre de disciplines toutes liées au fonctionnement de l'entreprise » [VADCARD 96].

Fig.0. Les trois pôles du Génie Industriel

Dans un contexte de concurrence croissante imposée par la mondialisation industrielle, les entreprises doivent augmenter leur potentiel d'innovation. Le développement des produits innovants doit être optimisé et la recherche scientifique doit répondre le plus rapidement possible aux problèmes qu'il suscite.

Les méthodes de conception garantissent la fiabilité du processus de développement des produits en permettant une amélioration globale de la qualité, en réduisant de façon robuste les délais et les coûts. Avant l'industrialisation de produits, toutes ces méthodes préconisent la validation des concepts ou des prototypes à l'aide de l'expérimentation.

L'observation et l'expérimentation font partie des sources d'informations pour la recherche scientifique. Dans beaucoup de domaines de la recherche, aussi bien fondamentale qu'appliquée, les expérimentations représentent les seuls moyens de validation d'une hypothèse ou d'une théorie.

L'expérimentation, outil de validation ou de confrontation de l'hypothèse à la réalité, nécessite des moyens spécifiques : les MOYENS D'EXPERIMENTATION. Leur développement fait partie des programmes de recherche et d'innovation. Leur optimisation, en terme de coût, qualité et délai, est également un vecteur de compétitivité.

2 Expérimentation – quelques définitions

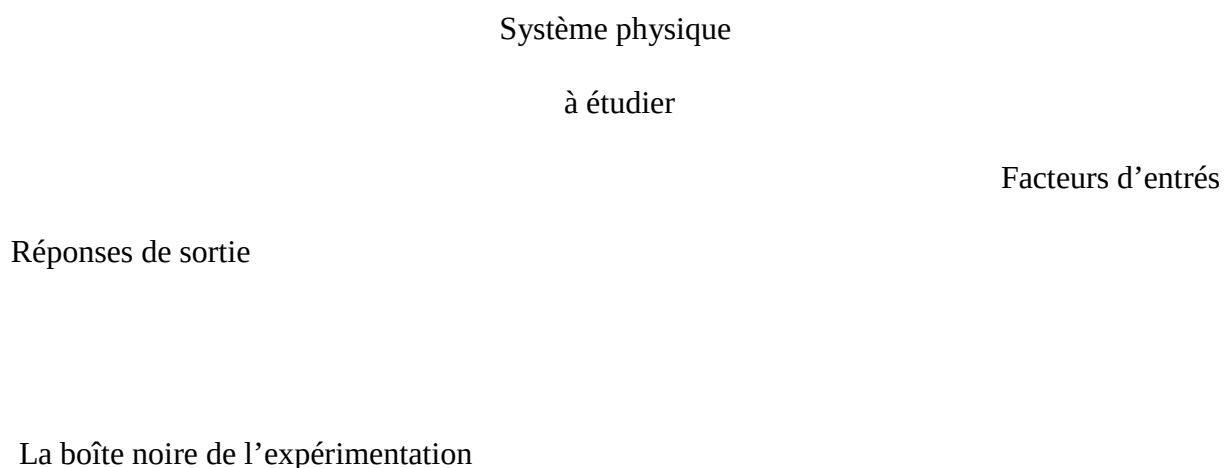
« L'expérimentation est l'emploi systématique de l'expérience scientifique » [OLF 86].
 L'expérience scientifique signifie l'expérience planifiée, argumentée, objective, et justifiée.
 Elle distingue l'investigation menée par le chercheur, les tâtonnements et les essais
 circonstanciels du praticien [VIGIER 91]

Les définitions ci-dessous montrent que malgré des objectifs plus ou moins différents, le principe commun de toutes les expériences scientifiques tient au fait que **pour étudier un (des) phénomène(s), il est nécessaire de provoquer ce phénomène pour en tirer des constatations** :

- L'expérience est une observation provoquée dans l'intention d'étudier certains phénomènes, de contrôler ou de suggérer une idée [VERRIER 99].
- « L'expérience est une intervention volontaire dans un système en fonctionnement pour observer ou mesurer les effets de cette intervention » [VIGIER 91].
- L'expérience est une épreuve qui a pour objet d'étudier un phénomène et d'en rechercher les lois [OLF 01]
- L'expérience représente des épreuves ou des essais effectués pour étudier un phénomène [Larousse 2000]

Selon A. Badiru [BADIRU 96], la plupart des laboratoires de recherche pratiquent la recherche expérimentale. « La recherche s'appuie sur les expériences scientifiques, dans lesquelles on étudie l'influence de quelques combinaisons de paramètres indépendants sur certains autres paramètres dépendants ». L'expérimentation est confondue à la manipulation des variables d'entrées en mesurant l'effet sur d'autres variables de façon à identifier les liens de cause à effet, s'ils existent. De ce fait, elle permet de corrélér de façon précise les variations observées aux variables manipulées. On la représente souvent sous la forme d'une boîte noire (fig. 2).

Fig.1.



Une boîte noire symbolise un phénomène (physique, chimique,...) ou un problème
 « technique » mal connu. Elle comporte trois éléments :

- **Le système physique à étudier** est la matière d'œuvre au sens large sur laquelle on va créer le phénomène souhaité (échantillon, éprouvette, produit, composant, cobaye, etc.).
- **Les facteurs d'entrée** sont les paramètres déclenchant et/ou influençant le phénomène à étudier. Ils sont définis en fonction des objectifs de l'expérimentation.
- **Les réponses de sortie** sont les éléments d'observation et les paramètres mesurés qui constituent la réaction du système par rapport aux influences des facteurs d'entrée.

L'expérimentation est le moyen qui établit le lien entre les facteurs d'entrée et les réponses de sortie du système. Elle permet d'identifier les relations entre eux et ouvre les voies de résolution du problème de la boîte noire.

Les fondements de l'expérimentation sont :

- la *reproductibilité* : on ne peut étudier scientifiquement un fait que s'il est reproductible à l'identique ; cela permet notamment la mise en évidence et la vérification des expériences ;
- l'*isolement des paramètres* : pour quantifier de manière précise l'influence de tel ou tel paramètre, il faut pouvoir l'isoler et le faire varier de manière indépendante des autres.

3 Définition du moyen d'expérimentation.

Un moyen d'expérimentation est un matériel, qui sert à réaliser une ou plusieurs expériences. Nous proposons cette définition qui regroupe tous types de matériels expérimentaux à l'exclusion des échantillons, des éprouvettes, des matières d'œuvres, etc.

Les moyens d'expérimentation (dans ce document, nous utiliserons les initiales ME pour les désigner) comprennent les bancs d'essais, les machines d'essais et tous les types d'équipements de mesures et d'expérimentation. Selon les ressources des encyclopédies et des dictionnaires :

- Banc d'essais : Installation permettant d'essayer en fonctionnement un moteur, une machine ou de façon plus général, un produit. Exemple : un banc d'essais d'endurance de pompe.
- Machine d'essais : ensemble complet permettant de produire suivant des protocoles définis les essais caractéristiques sur les échantillons. Exemple : une machine de traction statique.
- Equipement de mesure : équipement permettant de mesurer un ou plusieurs paramètres physiques, chimiques, numériques ou autres sur un dispositif. Exemple : une balance de pesage, un microscope.
- Equipement d'expérimentation : tous les autres matériels de laboratoire participant à la réalisation des expérimentations. Exemple : une machine de centrifugation pour séparer des substances qui ont des densités différentes, une soufflerie pour créer le vent dans le domaine de l'aérodynamique.

Le prototype d'un produit peut être considéré comme un échantillon, un ME ou l'ensemble des deux. Selon l'objectif de l'essai, la partie qu'on souhaite étudier peut être considérée comme l'« échantillon » ; la deuxième partie étant le moyen qui contribue à mettre la première en situation d'essais.

Dans chaque profession, les ME présentent des caractères plus ou moins particuliers, car ils sont très liés à leurs domaines d'application. Mais du point de vue pratique, on peut, néanmoins, les classer en trois familles :

La 1^{ère} famille est celle des **ME standards** qui ont leurs protocoles d'essais connus (normés ou standardisés), par exemple les machines de traction statiques ou les microscopes etc. Ils sont utilisés couramment et sont souvent présents dans les catalogues des fournisseurs. Ce sont des produits développés en série. Leur conception est très proche de celle des produits industriels.

La 2^{ème} famille rassemble les **ME spéciaux** ou non normés. Ils sont associés aux expérimentations nouvelles, aux projets de recherche dans des domaines très pointus ou aux applications dans des contextes spécifiques.

La 3^{ème} famille est celle des **ME mixtes**. Ce sont les machines d'essais de la 1^{ère} famille, à qui on ajoute les équipements spécifiques, dont on modifie certaines parties pour les adapter aux protocoles d'essais « modifiés ».

Cette distinction permettra de faire ressortir les différences dans le développement des uns des autres et de définir notre périmètre de la recherche.

4 Périmètre de notre étude

Limite dans le développement des ME spécifique ou mixtes.

Dans le développement des ME spécifiques ou mixtes, la problématique est différente par rapport aux ME standards. Contrairement aux ME standards qui sont destinés à une utilisation répétitive, les ME spécifiques et mixtes sont destinés à des projets précis. Ils ont donc une durée de vie souvent courte. Dans la mesure du possible, leur structure est constituée par un maximum de composants standards pour permettre de raccourcir le délai de développement. Les ME spécifiques sont développés de façon unitaire ou en très petite série. Leur développement n'autorise pas l'utilisation de procédés de fabrication en grande série.

Le développement des ME standards est en quelque sorte la suite du développement de certains ME spécifiques. Quand ces derniers permettent d'aboutir à une application étendue et reconnue dans leur secteur de recherche, leur protocole expérimental peut être standardisé et normé ; la demande d'abord spécifique va se généraliser. Le contexte de développement de ce type de ME, appartenant à la première famille, se rapproche de celui des produits industriels. On y répond par une phase d'industrialisation des ME spécifiques.

C'est pour ces raisons que nous sommes particulièrement intéressés par les Moyens d'Expérimentation Spécifique et Mixte. Par souci de commodité, à partir de maintenant, nous les appelons **MES** distincts du ME qui désigne les Moyens d'Expérimentation en générale.

Contexte du développement des ME

En France, très peu d'entreprises sont équipées de laboratoires de recherche qui possèdent des experts dans le développement des ME. Leurs activités sont orientées vers certains secteurs très développés comme la physique nucléaire, le pétrole, l'automobile, etc.

Pour les disciplines en développement, les entreprises innovantes ont des difficultés dans la réalisation de leurs essais. Et cela notamment dans les PME-PMI qui en général ne sont pas équipées de laboratoires spécialisés. Pour eux, le seul moyen d'avancer est de faire appel à des laboratoires d'essais ou des laboratoires de recherche publics ou académiques. C'est ce contexte qui retient notre attention.

Gilles REVOIL, dans son ouvrage « Assurance qualité dans les laboratoires d'analyses et d'essais », décrit que les laboratoires d'analyse et d'essais sont des entreprises particulières. La relation entre le demandeur et le laboratoire « va bien au-delà de la simple relation client – fournisseur », il faut instaurer entre eux « une relation de confiance forte » [REVOIL 95, p. 4]. Dans les laboratoires de recherche publics ou académiques, le demandeur peut être externe mais aussi être interne de laboratoire. Dans ce cas là, nous parlons de la relation entre le chercheur et l'ingénieur, celui qui conçoit le ME.

Mais la confiance n'assure pas la qualité des essais qui est difficilement palpable. L'analyse de ces relations particulières entre le demandeur et le laboratoire, entre le chercheur et l'ingénieur est un point important dans notre recherche.

Limite dans les ME à dominante mécanique

Dans le cadre de nos études, les ME qui nous préoccupent sont plutôt à dominante mécanique. Ils intègrent néanmoins des disciplines connexes telles que l'automatisme, l'électronique, la métrologie, la statistique, le traitement d'image, etc.

En conclusion :

Le périmètre de notre étude se limite au développement des ME nouveaux et spécifiques à dominante mécanique dans les domaines de recherche émergents et de l'innovation technologique.

5 Objectif de la thèse

Grâce à l'expertise acquise dans le cadre du laboratoire « Conception de Produits Innovants » (CPI) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), notamment dans la méthodologie de conception et d'innovation des produits industriels, nous proposons **d'améliorer la qualité des expérimentations en assurant la performance du moyen qui permet de le faire – le ME.**

Notre ambition est **d'optimiser le développement des Moyens d'Expérimentations avec l'objectif d'améliorer et de fiabiliser les Moyens d'expérimentation et de rendre leur développement plus rationnel.** Elle rentre dans le thème « modélisation des processus de conception et d'innovation ».

6 Enjeu économique de notre étude

Un nombre important de laboratoires de recherche exploitent les moyens d'expérimentation qui représentent un marché non négligeable. Les enjeux économiques que représente l'expérimentation justifient l'intérêt que nous portons au développement des moyens d'expérimentation.

En 1998, les travaux de recherche conduits en France représentaient 186 milliards de francs (Dépense Intérieure de Recherche et Développement). Dans les universités et établissements publics de recherche, ils sont équivalents à 70 milliards de francs, contre 116 milliards de francs dans les entreprises [CISAD 01].

En France, il y a 3300 équipes de recherche universitaire, 5200 entreprises qui emploient au moins un chercheur. Depuis 5 ans, chaque année, en France les crédits d'état destinés au financement de la recherche civile (BCRD) représentent plus de 7,5 milliards d'euros (50 milliards de francs) ; ce chiffre est en constante augmentation. Pour l'année 2003, le budget prévu est de 8,846 milliards d'euros [HAIGNERE 02]. La capacité d'investissement (**équipements scientifiques**, patrimoine immobilier) est de 3881 M€ en 2003 à comparer à 3835 M€ en 2002 donc une augmentation de 1,2%.

Ces données montrent que le marché des équipements scientifiques, dont les moyens d'expérimentation font partie, représente un secteur économique non négligeable. Mais la raison principale pour laquelle nous nous y intéressons tous particulièrement est l'enjeu scientifique et technologique de ce type de produits dans le processus de la recherche et du développement.

7 Structure du document.

Nos recherches, dont nous avons défini l'objectif, sont présentées dans ce document de la manière suivante.

La première partie, intitulée CONTEXTE et PROBLEMATIQUE de l'étude, présente les enjeux scientifiques et technologiques des moyens d'expérimentation, caractérise leur spécificité par rapport aux produits industriels et les classe en fonction de leur objectif expérimental. Une enquête réalisée auprès de 21 laboratoires français appartenant à différents domaines de recherche ainsi qu'une analyse détaillée du développement de quelques moyens d'expérimentations permettent d'identifier les différents écueils rencontrés dans leur développement. Notre recherche bibliographique nous a permis de faire le constat que les méthodes existantes ne sont pas adaptées au développement des moyens d'expérimentations. Elles ne permettent pas d'affronter les difficultés dans la conception de ceux-ci.

La deuxième partie, intitulée HYPOTHESE et PREMIER MODELE DE LA DEMARCHE DE CONCEPTION DES MES, propose l'hypothèse de résolution et développe le premier modèle de la démarche de conception. Elle présente des outils méthodologiques nouveaux : « l'analyse de l'expérimentation orientée fonctionnelle » et « l'analyse de la cohérence en coût – performance » associés à cette démarche.

La troisième partie, intitulée EXPERIMENTATION DE LA DEMARCHE, est consacrée aux expérimentations de cette nouvelle démarche de conception.

En fonction du contexte de développement des moyens d'expérimentation, la démarche est ouverte à un protocole d'application partielle qui montre son caractère flexible. Les projets **MACHA** et **Mini machine de traction** n'exploitent que la phase d'analyse de cohérence en coût - performance. Les projets **banc d'essai de ressort radial (steins)**, **banc d'essai des structures collage en composite** ainsi que le projet de **banc d'essai du grenailage par CO₂** n'utilisent que l'outil d'Analyse de l'expérimentation orientée fonctionnelle.

Pour démontrer la pertinence et valider la structure de la démarche proposée, le protocole d'application intégral est déroulé dans les projets suivants : **banc d'essai en fatigue d'endoprothèse aortique, équipement d'essai de délaminage à grande vitesse des composites, machine de mesure psychométrique « MAIN »**.

Une critique du premier modèle permet de tirer les conclusions nécessaires à son amélioration.

La conclusion générale de notre étude fait le point sur les avancées méthodologiques que nos travaux ont permis. Elle présente aussi les perspectives liées au développement futur de la démarche et à l'ouverture de son champ d'application.

P r e m i e r p a r t i e

CONTEXTE et Problématique de notre recherche

Introduction – Structure de la partie

Les **Moyens d'Expérimentation (ME)** sont des produits spécifiques. Leurs particularités résident dans leur mode de développement, leur mode d'utilisation et dans le caractère spécifique de l'expérimentation.

Le chapitre 1 est consacré à préciser le contexte de nos travaux de recherche. Il positionne le développement des ME dans le processus de la recherche et du développement de produits. Il identifie les enjeux scientifiques et technologiques. Ce chapitre présente également une typologie de l'expérimentation dont on déduira une typologie de ME. Les caractères spécifiques de l'expérimentation dans le contexte des laboratoires de recherche et de R&D permettent d'identifier les spécificités des ME et de leur développement.

Le chapitre 2 est dédié à un état de l'art du développement des ME. Les recherches bibliographiques effectuées n'ayant pas donné de résultats, c'est une recherche sur le terrain qui nous sert de référence. Elle comporte deux actions menées en parallèle :

- Une enquête destinée aux laboratoires de recherche et aux bureaux d'études R&D dans différents domaines d'activité [LUONG 01]. L'objectif est d'identifier les différentes façons de développement des ME, les difficultés dans la conception et les problèmes rencontrés dans leur utilisation.
- Les analyses effectuées sur plusieurs projets de développement des MES. Le but est aussi de faire ressortir les démarches de conception de ME si elles existent mais également de chercher les origines des problèmes rencontrés au cours de la conception.

Ces deux actions conduisent à la problématique de terrain expérimental. Elle présente une difficulté dans le développement qui entraîne une succession de reconceptions et une non-optimisation en terme de coût, qualité et délais.

Dans le chapitre 3, nous dressons, le panorama des méthodes de conception et des outils d'aide à la conception des produits. Ils sont très pertinents pour optimiser le développement des produits industriels. Une analyse relève les avantages et les inconvénients de ces outils pour la conception des MES. Elle permet de démontrer la nécessité de les adapter au contexte du développement et aux caractères spécifiques des MES.

Pour résumer cette première partie, nous formalisons la problématique de notre recherche.

chapitre 1

Contexte de notre étude

Dans ce chapitre nous étudions le contexte du développement des MES par l'analyse de leur rôle, leurs objectifs, leurs caractéristiques, leur environnement etc.

L'expérimentation joue un rôle important pour faire avancer la recherche scientifique et pour fiabiliser l'innovation et le développement de produits. La recherche fondamentale, la recherche appliquée et le développement de produits constituent un processus qui part de la création de connaissances jusqu'à l'apparition de produits que nous nommons « processus de la recherche et développement ». **Le ME en tant que produit est en même temps une finalité de ce processus et le support matériel de l'expérimentation, une activité interne à celui-ci.** Ainsi, l'analyse du positionnement des ME dans ce processus global permet d'identifier le contexte, les particularités et les typologies à la fois de l'expérimentation et du Moyens d'Expérimentations.

1 Recherche et développement

1.1 Quelques définitions

Recherche

L'Office de la langue française donne la définition de la recherche suivante : « La recherche est l'ensemble des travaux et activités tendant à la découverte de connaissances, de procédés ou d'objets nouveaux » [OLF 01]. Elle regroupe deux pôles d'activité principaux :

- **La recherche fondamentale** est la recherche de connaissances nouvelles et de champs d'investigation nouveaux, sans but pratique spécifique. Le chercheur s'efforce de mieux connaître et comprendre une « matière », sans se soucier de l'application pratique immédiate des nouvelles connaissances acquises.
- **La recherche appliquée.** « Recherche ayant un but pratique déterminé en vue de servir l'humanité dans un de ses besoins » (Unesco, HEMPTINNE 1978). On vise ici à l'application pratique de la connaissance scientifique; c'est le stade intermédiaire entre la découverte et l'utilisation quotidienne, où le premier effort de conversion des connaissances scientifiques en technologie [OLF 01].

L'expression « recherche fondamentale » a, pour certains, une connotation d'« art pour l'art » ou « savoir pour savoir ». D'autres objectent que le souci d'utilisation des résultats, dans un

avenir plus ou moins proche, est toujours présent chez le chercheur. Par ailleurs, la limite entre recherche fondamentale et recherche appliquée devient parfois difficile à tracer. Ainsi se justifie la proposition de CRONBACH et SUPPES d'appeler « recherche orientée vers des conclusions » toute recherche qui n'est pas explicitement entreprise pour préparer une décision [OLF 01].

Développement de produits

Quand on emploie le terme « développement de produits » en général, on sous-entend le développement des produits au sens large du terme ; c'est à dire des produits, des procédés, des services, des organisations, des systèmes etc. Il comprend tous les travaux d'adaptation, de mise au point, d'essai et de révision de prototypes. C'est la pré – industrialisation ou la phase initiale de l'innovation technologique qui permet l'apparition du produit. Elle se poursuit par le lancement en vraie grandeur du nouveau procédé ou du nouveau produit.

1.2 Processus de la recherche et développement

La notion « *recherche et développement* » (R&D) est définie particulièrement pour l'industrie : C'est un processus « qui va de la création du savoir à la diffusion d'un produit ou service faisant appel à ce savoir » [TARONDEAU 94, p.6]. Il inclut la découverte issue de la recherche scientifique, la conception de produits ou de service, et les mises au point destinées à s'assurer de la validité et de la fiabilité de ces produits ou services grâce à des tests techniques et à des études de faisabilité économique. Il regroupe en principe des phases de recherches appliquées et de développement, mais dans certains cas, on y intègre aussi la recherche fondamentale.

Selon le Grand dictionnaire terminologique [OLF 01], **la recherche fondamentale** est la première étape du processus (Fig. 2). Effectuée le plus souvent au sein des laboratoires publics ou des fondations, elle a pour priorité la découverte scientifique, la progression de la connaissance. Ses produits sont des découvertes diffusées dans des thèses de doctorat ou des revues spécialisées. Ses résultats sont non marchands.

Fig.2.



Trois activités du processus de la recherche et développement.

Source de l'Office de la Langue Française [OLF 00].

La recherche appliquée constitue la seconde étape du processus. Elle est un aspect de la recherche scientifique qui privilégie les applications industrielles, c'est-à-dire l'opérationnalisation. Ses produits sont notamment des inventions brevetables : définition des grandes lignes de procédés ou de produits nouveaux. Ce sont des produits marchands. Le financement de la recherche appliquée peut être privé ou public.

Le développement de produits, troisième étape du processus, est la phase de matérialisation des idées aux produits en utilisant les connaissances scientifiques et technologiques de la recherche. Il doit subir directement des lois économiques du marché.

Ces trois étapes sont en réalité trois pôles d'activités différents qui ne sont pas indépendants. Il arrive parfois qu'au cours d'une recherche appliquée, on fasse appel à la recherche fondamentale. Par exemple, le développement d'une nouvelle technologie peut engendrer le développement d'une nouvelle matière, et donc un besoin en nouvelles connaissances sur la matière. Cette succession de questions peut aboutir à d'autres applications de cette matière et ainsi de suite. Elle forme une boucle sans fin de la recherche fondamentale à la recherche appliquée jusqu'au développement de produits (Fig. 2). Un projet peut justifier à lui seul, les trois étapes successives du processus de la recherche et du développement.

2 Positionnement de l'expérimentation et du ME dans la recherche et le développement

2.1 Expérimentation dans la recherche et le développement.

Dans beaucoup de domaines scientifiques, les expérimentations représentent les seuls moyens de validation d'une hypothèse ou d'une théorie. L'observation et l'expérimentation sont des armes indispensables pour la recherche scientifique. Quelle que soit la façon de pratiquer, la recherche a besoin des expérimentations pour découvrir des phénomènes nouveaux, observer leurs évolutions, valider les hypothèses proposées, etc.

C'est non seulement la recherche, mais aussi le développement des produits et des procédés qui nécessitent de faire appel à l'expérimentation. Les exigences des normes environnementales, des normes de sécurité et d'utilisation imposent une maîtrise parfaite du produit nouveau avant sa mise en œuvre. L'expérimentation est intégrée dans le développement des produits et des procédés comme une étape indispensable pour valider les solutions choisies ou optimiser les paramètres de conception.

Recherche expérimentale

La recherche expérimentale est une approche de la recherche scientifique qui emploie systématiquement l'expérimentation. C'est une approche plutôt pragmatique mais structurée.

Selon François JACOB « Contrairement à ce que j'avais pu croire, la démarche scientifique ne consistait pas simplement à observer, à accumuler des données expérimentales et en tirer une théorie. Elle commençait par l'invention de monde possible, pour le confronter par l'expérimentation, au monde extérieur. Et c'était ce dialogue sans fin entre l'imagination et l'expérience qui permettait de se former une représentation toujours plus fine de ce qu'on appelle « la réalité » » [DORTIER 00]. Elle correspond à la méthode expérimentale telle que l'a formulé Claude BERNARD dans son ouvrage « Introduction à la médecine expérimentale ». La science expérimentale se déroule selon quatre étapes : « On part d'un fait problème, on pose une hypothèse, on cherche à tester l'hypothèse par l'expérimentation et de là, résulte de nouveaux faits problèmes, et ainsi de suite ... » [BERNARD 66]. Selon Claude BERNARD, le raisonnement expérimental comprend :

Le chercheur « constate », au cours d'une investigation méthodique, un **fait**. Par exemple, il voit que la rosée se dépose sur les objets métalliques, mieux que sur du bois. Ce pourrait être n'importe quoi d'autre, comme l'oscillation d'un pendule, la propagation des rides dans l'eau d'une mare quand on jette un caillou etc. Un **fait** qu'il s'agit d'expliquer. C'est le moment de l'**observation** scientifique. Le chercheur s'arrête sur un phénomène, l'isole et en quelque sorte se demande « comment se fait-il que »... le pendule se balance de telle manière, que la goutte d'eau ait telle forme, que la peau change de couleur dans telle maladie etc.

Ce fait « suggère une idée » d'explication du phénomène. Une idée naît dans l'esprit du chercheur, qui le conduit à poser une question. La raison de ce phénomène de la rosée n'est-elle pas que la propagation de la chaleur se fait mieux dans le métal que dans le bois ? C'est le moment de l'**hypothèse**. Claude Bernard estime que c'est surtout l'intuition et le sentiment qui engendrent l'hypothèse expérimentale. La formule « suggérer » indique que c'est l'observation qui est toute de même sensée donner une idée.

« L'idée enfin dirige l'expérience ». Afin de vérifier cette hypothèse, le scientifique institue une expérience qui a pour but d'infirmer ou de confirmer l'hypothèse qu'il a proposée. Si l'hypothèse est juste, il suffit de déposer dans l'herbe un morceau de cuivre (excellente conductivité), et de verre (conductivité quasiment nulle). On dit alors que **l'expérience juge l'idée**, c'est le moment de **vérification**.

Selon Jack GOUPY [GOUPY 01], le processus d'acquisition des connaissances par expérimentation se décompose en 4 grandes étapes :

- **Formalisation des questions - Problématique.** Le système à étudier est encore peu connu. Une phase exploratoire permet de poser des questions sur le sujet auquel on s'intéresse afin de fixer les objectifs de l'étude.
- **Inventaire des informations - Hypothèses.** Un état de l'art autour du système est réalisé pour recueillir les informations nécessaires. L'hypothèse est *fondée sur une réflexion théorique et sur la connaissance préparatoire du système étudié* [GOUPY 01].
- **Expérimentation.** On lance la démarche expérimentale (présentée en gris) pour acquérir progressivement les résultats nécessaires (la petite boucle) à valider ou invalider les hypothèses. Chaque fois que le bouclage se réalise, les connaissances sur le système étudié s'éclairent de plus en plus pour répondre au besoin de l'étude. L'analyse des résultats de l'expérimentation précédente se transforme en connaissances acquises et s'utilise pour les expérimentations suivantes.
- **Acquisition des connaissances – Perspectives.** La validation des hypothèses permet de répondre aux questions de départ. Si au cours de l'expérimentation, on découvre des éventuelles inconnues, les nouvelles questions peuvent se poser et l'étude reprend la grande boucle pour avancer dans la recherche sur le système.

Cette démarche se résume par le graphe de la (fig. 3).

Fig.3.

Choix d'une méthode d'expérimentation

Analyse des résultats

Expérimentation

Acquisition progressive des résultats

Connaissance du système

Système à étudier

Questions Q1, Q2, ...

Inventaire des informations

la petite boucle

la grande boucle

Processus d'acquisition de connaissances.

Selon Jack GOUPY [GOUPY 01]

Dans cette démarche, **la phase d'expérimentation est primordiale. Elle joue le rôle d'un outil de découverte, d'évaluation et de validation.**

Développement des produits

Aujourd'hui, plusieurs démarches de conception des produits et procédés sont développés. L'expérimentation devient une étape indispensable et s'inscrit dans les normes sur la conception des produits et procédés [NF X 50-151 ; NF X 50-152 ; NF X 50-153].

Dans le développement de produits, l'expérimentation est intégrée dans les phases de mise au point et de validation. Son but est la validation des propositions conceptuelles dans un but précis : celui de la satisfaction des clients. La dernière se présente sous forme d'un cahier des charges du besoin.

Dans le développement de produits, le but de l'optimisation est d'accroître le rapport qualité/prix. Selon TAGUCHI, la pratique de l'expérimentation est une des méthodes d'optimisation [TAGUCHI 84], [OSBORNE 96].

2.2 Positionnement des ME dans le processus de la recherche et développement.

Comme présenté ci-dessus, ce processus comporte 3 grandes activités (Fig. 2) : la recherche fondamentale, la recherche appliquée et le développement. Les démarches liées à chaque activité imposent les expérimentations comme autant d'outils indispensables de l'étude. Les moyens d'expérimentation sont les supports de mise en œuvre de ces expérimentations. Concrètement, nous présumons que le bouclage dans la Fig. 2 peut se matérialiser comme dans la Fig. 4

Fig.4.



La position de ME dans le processus de la recherche et développement

Le bouclage de connaissances commence par la recherche fondamentale en y associant la recherche appliquée sous forme de connaissances scientifiques et technologiques, en passant par le développement pour aboutir aux produits (la flèche blanche). Une filière de la recherche appliquée est consacrée au développement des technologies qui sont nécessaires au développement des ME. Les ME sont des produits spécifiquement utilisés pour alimenter tous les pôles d'activité du processus (les flèches grises). Cette position stratégique des ME dans le processus démontre que : **L'avancement de la recherche, et donc la création des connaissances, dépend en partie de la performance des ME. Le délai de développement des ME influence directement l'évolution plus ou moins rapide de la recherche et du développement.**

3 Typologie de l'expérimentation et du moyen d'expérimentation

3.1 Typologie de l'expérimentation

Au sein des trois pôles d'activité, recherche fondamentale, recherche appliquée et développement de produits, l'expérimentation est intégrée dans leur démarche et constitue un

passage obligatoire. Mais le contexte et le besoin en expérimentation sont différents d'une activité à l'autre.

Dans le domaine de la recherche fondamentale, les modèles théoriques sont souvent extraits de leur environnement particulier car on cherche les lois, les principes généraux et universels. On essaie d'obtenir le découplage entre les paramètres nécessaires au modèle théorique, et on neutralise les autres paramètres. Cela évite que les effets liés à un environnement particulier puissent influencer le phénomène principal de l'étude.

Dans le domaine de la recherche appliquée, on cherche à développer des techniques nouvelles en s'appuyant sur les connaissances de base que fournit la recherche fondamentale. Dans ce cas, les expérimentations sur la technique étudiée doivent tenir compte d'un maximum de paramètres liés à l'environnement de son application. Afin de rendre la technique plus robuste et selon le but recherché, on essaie de maîtriser et/ou d'évaluer l'influence de ces paramètres [TAGUCHI 00]. On cherche aussi à optimiser les performances de la technique étudiée. A cette fin, la méthode des plans d'expériences de TAGUCHI est un outil pertinent [PILLET 97], [VIGIER 91], [LEGENDRE 97].

La différence entre l'expérimentation en recherche et celle **en développement de produit** tient au fait que dans ce dernier, le contexte spécifique de l'industrie impose un objectif ciblé. Les expérimentations servent à valider et/ou optimiser le produit selon son Cahier des charges. Elles doivent tenir compte des paramètres perturbateurs liés aux conditions d'utilisation précisées dans le cahier des charges et non pas de tous les paramètres perturbateurs possibles comme dans la recherche appliquée. L'optimisation des concepts doit être limitée aux possibilités de l'entreprise et de ses applications.

L'industrie place l'expérimentation dans un contexte concurrentiel où le délai devient un critère important pour la réussite du projet.

En fonction du niveau plus ou moins avancé de la connaissance acquise sur le sujet, l'expérimentation aura des caractéristiques particulières.

L'expérience « pour voir » est la situation que crée un chercheur, non pas pour vérifier une hypothèse formulée de façon précise, mais pour observer le comportement du phénomène. L'expérience « pour voir » marque un stade intermédiaire entre l'observation pure et simple, et l'expérimentation rigoureuse. A noter que cette expérience sert à explorer, à créer des conditions favorables à la formulation d'hypothèses nouvelles.

Les expérimentations « rigoureuses » visent à l'évaluation des valeurs nécessaires pour formuler les lois, et à la validation des hypothèses proposées. Dans le cas d'invalidation de certaines hypothèses, elles permettent aussi d'améliorer et de proposer des nouvelles hypothèses.

En tenant compte du contexte et des objectifs d'expérimentations, nous proposons de les classer selon quatre grandes familles :

- La famille des **expérimentations de découverte** correspond à la phase de « description d'objets singuliers » de la recherche. On observe le phénomène dans des conditions courantes afin de retirer des hypothèses. Ce sont des expérimentations « pour voir », où on s'attache à des valeurs plutôt qualitatives.

- La famille des **expérimentations de caractérisation** correspond à la phase de généralisation des connaissances. On reproduit le phénomène sur lequel interviennent différents paramètres en les poussant au dehors des conditions courantes ci dessus, afin de valider et de limiter les champs de validation des hypothèses.
- La famille des **expérimentations de spécification et d'optimisation** : Le but est l'application des connaissances acquises dans des contextes spécifiques. On cherche la meilleure composition des paramètres d'entrée pour optimiser cette application. On trouve souvent ce type d'expérimentation dans la recherche appliquée ou dans le développement (dans la phase d'adaptation, de mis au point ou d'optimisation)
- La famille des **expérimentations de validation** : On les utilise le plus souvent dans l'industrie pour valider un concept, un produit ou un procédé. Dans le processus de développement produits et procédés, elles s'intègrent dans la phase de validation.

Ce classement est important pour définir l'objectif de l'expérimentation et la manière de la mener. Il est représentatif du niveau de connaissances acquises sur le phénomène à étudier. Pour le même objectif, si le phénomène est très complexe, les expérimentations peuvent encore être divisées en plusieurs niveaux d'étude qui correspondent chacun à un bouclage dans la démarche expérimentale (Fig. 3). Selon les experts en Plans d'Expériences, [LEGENDRE 97] le nombre de paramètres étudiés dans chaque séquence d'expérimentation ne doit pas dépasser 15 variantes pour avoir une expérimentation efficace.

3.2 Typologie des ME

Suivant les catégories d'expérimentation à réaliser, les ME ont des caractères appropriés. Nous proposons donc de classer les ME en quatre catégories :

- **Catégorie 1.** regroupe les ME qui sont utilisés pour les expérimentations de découverte ou d'observation. Dans la première étape d'un programme de recherche qui s'intéresse à la « description d'objets singuliers » le ME reproduit le phénomène originel donnant un maximum de possibilités d'observation et de modification des situations. Par contre, les résultats d'observation sont souvent d'ordre qualitatif.
- **Catégorie 2** regroupe les ME qui sont utilisés pour les expérimentations de caractérisation. On reproduit le phénomène sur lequel interviennent différents paramètres prédéterminés. Dans ce cas, les ME doivent être équipés d'outils de mesure et d'observation d'ordre quantitatif dont la précision est la performance déterminante.
- **Catégorie 3** regroupe les ME qui sont utilisés pour les expérimentations d'optimisation et de spécification. Dans ce cadre, on étudie exclusivement la variation des paramètres concernés par l'application spécifique dont les champs des paramètres sont réduits. On peut utiliser le ME de la deuxième catégorie. Mais le développement des ME spécifiques permet une meilleure pertinence de l'expérimentation. Il augmente sa performance et permet de s'approcher de la réalité de l'application.
- **Catégorie 4** regroupe les ME qui sont utilisés pour les expérimentations de validation. On les rencontre souvent dans l'industrie, pour valider un concept, un produit ou un procédé avant sa mise en production ou en utilisation réelle. Sous forme d'un banc de test, le ME reproduit les fonctions, les analyse et les valide par rapport à un cahier des charges.

Le classement des ME selon leurs objectifs d'expérimentation conditionne la marche à suivre pour réussir leur développement et optimiser leur performance.

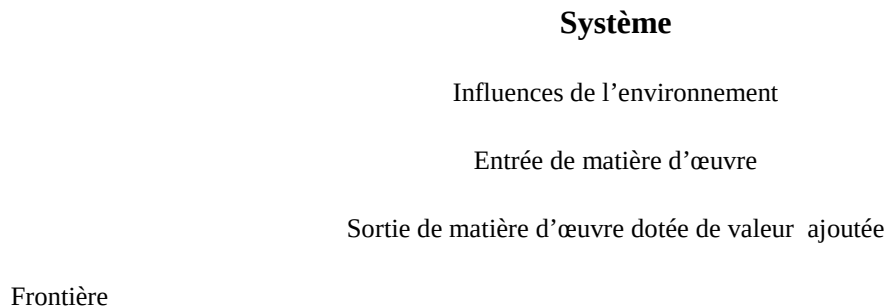
4 Caractéristiques du MES

Nous avons maintenant compris l'importance des ME dans l'avancement de la recherche et du développement de produits. Mais la question qui se pose est : pour quoi le développement de ME diffère du développement de produits ? La réponse est dans l'analyse de leurs caractéristiques spécifiques.

Les ME sont les produits du type « système ». La norme française (NF E 90.001) définit un système comme une association de sous-systèmes constituant un tout organique complexe destiné à remplir une fonction générale.

Selon la définition proposée par Joël de ROSNAY : « *Un système est un ensemble d'éléments, en **interaction dynamique**, organisés en fonction d'un but* » [ROSNAY 75]. « *Il s'agit d'un ensemble identifiable assurant une fonction globale et doté d'une structure qui évolue dans le temps et dans un environnement pour une finalité* » [TEIXIDO 98].

Fig.5.



Modélisation d'un système

Source [TEIXIDO 98]

Dans le cas des MES, la matière d'œuvre n'est rien d'autre que le système physique à étudier dans son état initial et la finalité de cette matière d'œuvre est l'état final de celui-ci avec les résultats d'essais que l'on souhaite obtenir.

Dans l'industrie, on classe les ME avec les autres équipements industriels comme des machines spéciales ou des équipements de contrôle.

Les ME ont les caractéristiques des machines spéciales. Comme les machines spéciales, ils ne sont pas des produits grand public. L'utilisateur n'est pas le monsieur « *tout le monde* » mais il est bien défini : c'est l'expérimentateur.

Puisque l'utilisation est typiquement expérimentale, les normes de sécurité sont différentes de celles des produits grand public. Comme les machines spéciales, les MES doivent subir des contraintes spécifiques liées à une utilisation professionnelle.

Comme des machines spéciales, les ME ne sont pas des produits de grandes consommations. On les développe souvent de façon unitaire ou en petite série.

Mais, les ME sont des machines très spéciales. Les ME ne sont pas, pour de nombreuses raisons, des équipements industriels conventionnels comme les autres. Leurs caractérisations liées aux contextes d'utilisation et de développement sont très différentes. L'origine de cette différence réside dans l'objectif fondamental des MES

Selon la société APTE, avant le développement d'un produit quelconque, une analyse du besoin fondamentale s'impose. « La bête à corne » est le graphe symbolique de cette analyse. Nous sommes amenés à étudier la « bête à cornes » du MES. Dans notre cas elle peut représenter comme sur la Fig. 6

Fig.6.

MES

A qui rend t-il service ?

Sur quoi agit-il ?

Dans quel but ?

Système physique phénomène à étudier

Réaliser une expérimentation

Chercheurs expérimentateur

La « bête à cornes » du MES.

Différent des autres produits, le MES agit sur un système dont le comportement est inconnu au moment de sa conception. De plus, le résultat final de cette intervention, lui aussi, n'est qu'une supposition à valider par l'expérimentation.

En analysant plus en détail les différents éléments de cette « bête à cornes », nous constatons les points suivants :

La particularité du ME est liée à l'aspect imprévisible du phénomène à étudier. Le but de l'expérimentation est d'étudier un phénomène inconnu ou peu connu pour lequel l'évolution du phénomène et les interactions entre les différents paramètres réservent souvent des surprises. Un des points qui différencie les MES des équipements de contrôle, est lié à cette particularité. Elle entraîne aussi les principales difficultés qui caractérisent le développement des ME.

Les ME qui mettent en œuvre des essais sont dans certains cas comparables à des équipements de production qui eux mettent en œuvre des procédés.

Contrairement à un équipement de production qui est conçu pour transformer la matière d'œuvre de l'état initial à l'état final souhaité, un ME est conçu pour créer un phénomène sur cette matière d'œuvre, le maîtriser, et observer son évolution de l'état initial à l'état final (Fig. 7).

Fig.7.



Changement d'états du MES et de la machine spéciale

Pour les équipements industriels, c'est le résultat final qui est important. Tandis que dans le cas du ME, c'est **le chemin de la transformation** imposé par l'expérimentateur qui doit être respecté. Le résultat final est celui qu'on étudie et non pas celui que l'on impose. Par exemple, une machine d'essais en cisaillement est différente d'une machine de découpe par cisaillement.

Dans le développement des équipements industriels qui met en œuvre un procédé nouveau, toutes les étapes du procédé doivent être testées avant la conception de l'équipement. Le développement des différents ME, associés aux tests, est souvent obligatoire dans la phase amont du développement de l'équipement.

Les ME ont un niveau de complexité très varié selon le besoin. Parfois on développe des ME pour essayer chaque étape d'un procédé ou chaque option d'un produit. Dans d'autres cas, on développe un MES pour tester tout un système dans son environnement complexe.

5 Conclusion

Ce chapitre présente les différents aspects qui constituent l'environnement des ME.

Le développement des moyens d'expérimentation a une position très importante dans le « processus de la recherche et développement » qui va de la création de connaissances jusqu'aux produits. Le développement des moyens d'expérimentation fournit les matériels nécessaires pour réaliser les expérimentations dans les trois pôles d'activités de ce processus.

Afin de mieux connaître les ME, nous tenons à étudier les expérimentations qui sont le but de développement des ME.

A chaque niveau d'avancement de la recherche et du développement, il y a un type d'expérimentation approprié. Nous avons donc identifié 4 types d'expérimentations différentes : expérimentation de l'observation (ou pour voir), expérimentation de caractérisation, expérimentation de spécification et d'optimisation et expérimentation de validation.

Cette typologie de l'expérimentation nous a permis de classer les MES aussi en quatre catégories comparables. Ce classement permet de mieux distinguer les caractéristiques des uns des autres. Il profitera à l'analyse du besoin fondamental des MES à développer.

En fin, l'étude comparative entre le MES et d'autres produits industriels, en particulier les machines spéciales, nous a permis de révéler les caractères spécifiques de ceux-ci. Elle nous apporte les éléments nécessaires pour comprendre les difficultés de leur développement que nous présenterons dans le chapitre suivant.

chapitre 2

Etat de l'art sur le Développement des Moyens d'Expérimentation

1 Introduction

Les études bibliographiques portant sur le sujet « développement de moyens d'expérimentation » montrent que les ouvrages sur les études expérimentales sont nombreux mais qu'ils ne présentent pas le développement des ME associés.

En consultant les ressources de « science directe » [www.sciencedirecte.com], dans plus de deux mille articles qui citent les résultats d'expérimentation, nous ne trouvons que 36 articles qui expliquent leur déroulement. Seulement deux d'entre eux présentent l'aspect fonctionnel du ME associé à l'expérimentation. Aucun article n'aborde les travaux de développement des ME.

La plupart des chercheurs ne considèrent le ME que comme un support de l'expérimentation n'ayant qu'un rôle secondaire dans le travail de recherche (dossier 15 de l'enquête) [LUONG 01a]. Ils ne les évoquent que lorsqu'ils font l'analyse de leurs limites opérationnelles, sans remonter à la source des imprécisions ou des dysfonctionnements liés au ME.

Le contexte concurrentiel de l'industrie et donc des laboratoires à son service, limite la communication aux résultats de la recherche. Les connaissances particulières, les savoir-faire à l'origine de ces résultats ne sont pas divulgués ; le développement des MES en fait partie.

Les seuls documents trouvés, qui présentent des projets de développements de MES, sont les rapports de Projet de Fin d'Etude (PFE) de l'ENSAM pour lesquels nous avons une autorisation d'accès.

Afin de mieux connaître le contexte de développement des MES et de déterminer les besoins de ce marché, nous avons réalisé une enquête auprès des laboratoires de recherche et de R&D. Une analyse plus concrète est réalisée à l'ENSAM sur quelques projets de développement de MES réalisés de 1997 à 2002. Ces travaux ont apporté les informations nécessaires à la définition de notre problématique de terrain expérimental.

2 Enquête sur le développement et l'utilisation de ME

2.1 Objectifs de l'enquête

Cette enquête est le seul moyen pour nous de connaître le mode de développement et d'utilisation des ME dans d'autre établissement que l'ENSAM. Elle vise les laboratoires de recherche publiques et les unités de R&D dans l'industrie.

L'enquête porte sur 3 thèmes relatifs au développement actuel des ME, à leur utilisation et aux recommandations méthodologiques qui permettront d'améliorer leur développement.

Le thème 1, « enseignement sur le développement des ME », s'adresse aux concepteurs. Son but est d'acquérir un maximum d'informations sur leur mode de travail et de relever les difficultés majeures dans le développement des ME. On demande, dans ce thème, leur point de vue sur la nature et l'origine de ces difficultés. Nous mettons l'accent sur les difficultés spécifiques qui différencient le développement des MES à ceux des produits industriels.

Le thème 2 « enseignement sur l'acquisition et l'exploitation des ME » s'adresse aux chercheurs. Les questions leur sont posées en tant que demandeur et utilisateur de ME. Comment définir le besoin et rédiger le Cahier des Charges associé ? Quels sont les défauts importants dans les ME qu'ils utilisent ? Quelles sont les solutions pour les pallier ?

Le thème 3 « Expression du besoin en méthodologie » consiste à soulever les besoins des concepteurs et des chercheurs pour améliorer la qualité de développement des MES.

En tenant compte des moyens disponibles du laboratoire, l'enquête est réalisée par un questionnaire par correspondance. Pour bien mener l'enquête, nous nous appuyons sur la démarche proposée par le CNRS - Délégation aux Systèmes d'Information [RATIER 98].

La population de cette enquête regroupe des laboratoires utilisant des ME à dominante mécanique. Elle est limitée au territoire français. Les catégories concernées sont les laboratoires de recherche académique, les laboratoires d'essais et les laboratoires de recherche et développement (R&D) dans l'industrie.

Une centaine de laboratoires sont choisis parmi les laboratoires des Grandes Ecoles, du CNRS et des grandes entreprises automobiles, transport etc. La répartition dans les différents domaines de recherche est le critère principal du choix des candidats. Leurs publications relatives aux expérimentations sont les indices de sélection car ils démontrent leurs éventuelles expériences dans le domaine des moyens d'expérimentation.

Le questionnaire comporte 3 fiches (Annexe 1) avec un total de 24 questions. Elle comporte les questions de classement en secteur, en catégorie de taille budgétaire. Les questions principales font le tour des 3 thèmes ci-dessus. Il pose aussi des questions sur l'utilisation des méthodes de conception et d'expérimentation.

2.2 Résultats de l'enquête

Débuté en janvier 2001, la collecte est peu nombreuse : 21 dossiers reçus sur 108 dossiers envoyés.

La validation de l'échantillon est effectuée selon deux critères. La diversité des secteurs sondés démontre qu'il est représentatif de la population (critère principal du choix des

candidats). Par laboratoire sondé, le budget moyen dédié à l'acquisition de ME s'élève à 220 mille € par an dans le secteur public. Il correspond à la valeur moyenne fournie par l'état [Les grands chiffres]. Ce calcul démontre que la taille du budget des laboratoires sondés est l'image des laboratoires de recherche en France.

Le déséquilibre entre le nombre de réponse des laboratoires R&D et des laboratoires de recherche académiques (5/16) est lié au problème de confidentialité découlant d'une plus forte concurrence dans l'industrie.

Nos plans de dépouillement utilisent le paramètre de budget dédié aux ME comme un coefficient de taille pour pondérer les réponses.

Toutefois, le faible nombre de réponses ne permet pas d'obtenir des résultats quantitatifs très précis. Mais l'enquête apporte beaucoup d'informations très intéressantes. Les réponses aux questions ouvertes donnent l'occasion aux sondés d'ouvrir le débat sur le sujet. Quelques interviews par téléphone nous ont aidé, par la suite, à éclaircir leurs idées.

2.2.1 Développement des ME

Les informations issues de cette enquête mettent en évidence la complexité et les difficultés rencontrées lors de la phase de développement de MES.

Structure de projets - Ressource humaine.

Dix-huit laboratoires sur vingt-et-un déclarent développer eux même les MES (au moins la conception). Les catégories de MES développées le plus souvent sont celles des équipements spécifiques ; les bancs d'essais sont moins fréquents et les machines d'essais sont plus rares. Le budget qui leur est dédié représente en moyenne 58,5% du budget globale d'investissement du laboratoire. Malheureusement, tous les laboratoires ne disposent pas d'une équipe de concepteurs expérimentés (dossiers 5 et 6 de l'enquête) [LUONG 01a]. La taille des projets est très variée selon les catégories de MES et selon le secteur de recherche. Leur budget varie entre mille cinq cents euros et un million d'euros. Les projets se déroulent sur une période de 1 mois à 3 ans. Mais le nombre de participants ne dépassent pas 6. Il est en moyenne de 2,6 personnes, ce qui est peu par rapport à l'investissement mis en jeu. Les projets de développement des MES sont donc en générale des « petits projets » selon la définition de l'AFITEP [AFITEP 98] ou de WESTNEY [WESTNEY 91].

Utilisation du budget.

La répartition du budget dans les différentes étapes de développement (Graphe 1) démontre que la part des composants standards est très importante dans un MES (presque le double par rapport à celle de composants spécifiques). Cela explique que le choix des composants standards peut jouer un rôle important dans l'optimisation du coût des MES.

Etude d'avant projet -conception

Composants standards

Composants spécifiques

Montage

Graph. 1. Répartition du budget de développement dans un MES.

Selon les dossiers 2 et 8 de l'enquête [LUONG 01a], le montage est souvent long à cause des retouches et des mises au point très complexes. Cela explique sa part importante dans le budget de développement des MES.

On constate souvent que « le développement des MES demande beaucoup de matière grise pour arriver au produit final pourtant simple » (dossiers 20). Dans les 22% du budget, on ne prend en compte que la partie sous-traitée ou les dépenses visibles de conception. L'investissement interne du laboratoire comme les heures de travail des membres de l'équipe projet est souvent inestimable.

Contrainte budget - délai.

Le budget disponible est une contrainte forte (17/18 réponses) dans le développement d'un MES, surtout pour les laboratoires qui ont des petits et des moyens budgets (moins de un million de franc par an). Les laboratoires académiques se retrouvent souvent dans la situation de gérer les budgets annuels.

Le délai n'est pas une priorité majeure, seulement 7/18 des laboratoires déclarent que la contrainte principale est le délai. Ce sont essentiellement les laboratoires industriels. Dans les laboratoires de recherche publique, les MES sont souvent développés dans le cadre d'une

thèse doctorale ou d'un DEA ou d'un Projet de Fin d'Etudes (PFE pour les écoles d'ingénieurs) etc. Le problème est d' « amener le MES à un état de finition lui permettant de pouvoir être utilisé par un autre expérimentateur que celui ayant participé à son développement après son départ » (dossier 13) [LUONG 01a]. La durée d'un projet de thèse ou d'un DEA ou encore d'un PFE n'est qu'un délai « provisoire » pour finir une phase de développement. L'efficacité de l'échange entre prédécesseur et successeur influence l'état d'avancement du projet.

Difficultés techniques.

Les difficultés en cours de développement de MES sont liées aux caractères spécifiques de chaque projet. Les problèmes qui reviennent le plus souvent sont liés à la maîtrise de l'environnement du MES (dossiers 9 et 16) [LUONG 01a]. La nouveauté du sujet de la recherche est un obstacle dans la conception car elle est à l'origine d'incertitudes qui obligent un développement itératif. A chaque fois, un prototype est associé à un niveau de définition (dossiers 2, 5 et 18) [LUONG 01a].

Quand on utilise des composants standards, on rencontre souvent la difficulté de définir l'influence de l'environnement spécifique de l'essai sur leurs performances. Les communications avec les fournisseurs ne sont pas toujours faciles, surtout avec les fournisseurs étrangers (dossier 16) [LUONG 01a].

Manque méthodologique.

Dans le cadre des laboratoires sondés, aucune méthode de conception existante n'est utilisée pour développer les MES. Les outils d'aide à la conception ne sont pas très employés (sauf les outils de simulation et CAO). Trois argumentations sont fournies par les enquêtés :

1. 1. Le manque de connaissances sur tous les outils méthodologiques existants empêche le choix d'une méthode adaptée au projet à réaliser.
2. 2. Les méthodes générales en conception ne conviennent pas aux problèmes à traiter.
3. 3. Une méthode de conception qui puisse s'adapter au développement des MES ne peut pas exister, car les MES sont très différents les uns des autres. Pour chaque projet, on doit trouver une démarche qui lui est propre.

Selon un enquêté, « Nous faisons appel au bon sens. Nous n'avons rien à attendre de plus d'une méthode de conception générale ». Son avis est partagé par plusieurs autres, qui ne pensent pas que les méthodes de conception peuvent résoudre leurs problèmes.

2.2.2 Acquisition et exploitation des ME

Insatisfactions.

L'enquête montre que 19/20 des laboratoires ont déjà rencontré des problèmes lors de l'acquisition des ME, surtout des MES. Or, le développement des MES consomme 65,5% du budget des laboratoires.

La nature des problèmes est diverse. Le graphe 2 montre leur fréquence d'apparition en pondération avec le niveau budgétaire des laboratoires. Parmi ceux-ci, on notera plus particulièrement (dans l'ordre décroissant de la fréquence):

- La mauvaise conception (colonne 1),
- La mise en œuvre complexe (colonne 9),
- L'étalonnage difficile ou inexistant (colonne 4),
- La précision insuffisante (colonne 2),
- La mauvaise répétitivité (colonne 3),
- Le coût d'exploitation élevé (colonne 12),
- L'influence trop importante des facteurs perturbateurs (colonne 7),

1. La mauvaise conception
2. La précision insuffisante
3. La mauvaise répétitivité
4. L'étalonnage difficile ou inexistant
5. La sensibilité trop faible
6. Les incertitudes de mesure
7. L'influence trop importante des facteurs perturbateurs
8. L'équipement ou outillage inadapté
9. La mise en œuvre complexe
10. La manipulation difficile
11. Les normes de sécurité non respectées
12. Le coût d'exploitation élevé
13. Le potentiel d'évaluation ou d'adaptation faible
14. Autres

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

Graph. 2. Problèmes rencontrés lors de l'utilisation de MES

L'écart entre le modèle expérimental auquel correspond le MES, et le modèle théorique souhaité, n'est pas facile à évaluer. Les procédures d'étalonnage ne permettent pas toujours de valider le modèle expérimental.

Les insatisfactions des chercheurs démontrent que les MES pourraient être mieux exploités. Leur conception devrait au moins permettre d'éviter certaines « retouches » qui vont parfois jusqu'à la reconception totale, qui induit une perte de temps et d'argent.

Origines des problèmes.

Selon un laboratoire spécialiste en prestation d'essais industriels, la définition insuffisante du cahier des charges est une origine majeure de ces défaillances. « Le cahier des charges détermine le besoin fonctionnel et les résultats attendus mais ne spécifie pas toutes les exigences de résultats attendus, ni les exigences de moyens à mettre en œuvre, ni les contraintes imposées à la conception » (dossier 20) [LUONG 01a].

En répondant à la question « Comment définit-on le cahier des charges », aucun laboratoire n'utilise un outil méthodologique. Le mode de fonctionnement courant est une réunion de l'équipe pour décrire l'expérimentation à réaliser. Mais le cahier des charges peut aussi être simplement à la charge d'un membre de l'équipe. La concertation avec le sous-traitant ne se fait que dans le cas où le MES est complètement sous-traité.

Les ambiguïtés dans la rédaction du cahier des charges et dans la rédaction des propositions techniques du sous-traitant peuvent causer des interprétations différentes entre le rédacteur et le lecteur. La mauvaise communication entre le bureau d'étude et l'atelier accentue encore ces effets (dossiers 6 et 20) [LUONG 01a].

L'environnement d'utilisation réserve beaucoup de surprises. Il crée des difficultés à la mise en œuvre, qui influent sur le déroulement d'essais et sur les résultats (dossiers 7, 9 et 16) [LUONG 01a]. Ces avis rejoignent celui des concepteurs (§2.1 ci dessus). La complexité liée à l'environnement impose des contraintes supplémentaires au MES qui ne sont découvertes qu'au moment de l'utilisation. Ce problème engendre des améliorations ou des reconceptions successives.

2.2.3 Analyse des attentes des chercheurs et des concepteurs

Pour connaître les attentes des chercheurs et des concepteurs, les questions portent principalement sur la nécessité d'un support méthodologique.

Les avis sont partagés entre pour ou contre une méthode spécifique de conception des MES (9/18 réponses favorables). Quand on le pondère avec l'ampleur du budget de développement des laboratoires, le résultat est réellement favorable à la nécessité d'une méthode de conception spécifique (73%). Ce calcul démontre que le besoin de méthode est d'autant plus fort que le budget mis en jeu est important.

Types de supports méthodologiques souhaités ?

Les laboratoires qui disposent d'un budget important ont exprimé leurs préférences en matière méthodologique :

- • Un guide présentant les différents outils existants (6/18 réponses comportant 93% du budget total du sondage)
- • Une formation aux différents outils existants (5/18 réponses comportant 84% du budget total du sondage)
- • Un guide présentant une démarche avec différents niveaux de complexité, chacun adapté à celui du problème à traité (4/18 réponses comportant 71% du budget total du sondage)

Pour ceux dont le budget s'avère faible, les préférences portent sur des outils méthodologiques permettant de surmonter le manque d'expérience dans la conception :

- • Un logiciel de simulation aidant à optimiser la conception des MES (6/18 réponses comportant 7% du budget total)
- • Une sensibilisation aux différentes disciplines pouvant intervenir dans le processus de conception (6/18 réponses comportant 6% du budget total)
- • Un dictionnaire des problèmes rencontrés et des solutions envisagées (3/18 réponses comportant 4% du budget total).

En général, leurs suggestions concernent les deux acteurs du développement : les chercheurs qui analysent le besoin et le déclinent en cahier des charges, les concepteurs qui y répondent.

Caractéristiques pour une bonne méthode de développement des MES ?

En tenant compte du contexte spécifique de développement des MES, « la méthode de conception spécifique doit assurer une utilisation facile par les expérimentateurs » (dossier 5) [LUONG 01a] . Ils n'ont pas forcément beaucoup d'expérience dans la conception et n'ont pas toujours compris le langage spécifique du concepteur. « La méthode doit s'adapter à la situation et au niveau de complication du projet » (dossiers 6 et 9) [LUONG 01a].

L'analyse du besoin est très importante dans le développement de MES (dossiers 4, 18 et 20) [LUONG 01a]. Pour assurer la réussite du projet, cette analyse doit présenter toutes les facettes du sujet. Pour ce faire, un investissement préalable sur la méthode d'expérimentation est nécessaire. La remarque « de quelle méthode d'expérimentation partez-vous pour concevoir le MES ? » (dossier 15) [LUONG 01a] permet de faire le lien entre la démarche expérimentale et la conception du MES.

La méthode doit assurer une sensibilisation aux différentes disciplines et le travail en équipe multidisciplinaire est donc un atout. La prise en compte de l'environnement d'utilisation spécifique du projet (dossiers 7 et 9) [LUONG 01a] implique la communication entre le concepteur et l'utilisateur. Il faut « solliciter la participation de l'utilisateur final, du manipulateur pour analyser la solution » (dossier 18) [LUONG 01a].

L'acquisition de connaissances liées au domaine de la recherche par les concepteurs est primordiale pour la réussite du projet. Elle oblige une capacité d'apprentissage rapide et optimale. La méthode doit aider à poser les bonnes questions (dossier 7) à gérer les interfaces entre les disciplines (dossier 18).

La capitalisation des expériences dans le développement de MES (dossiers 7 et 21) est d'autant plus importante quand les domaines de recherche sont spécifiques et nouveaux. Elle permet aux équipes de développement d'enrichir leur savoir-faire, d'acquérir une base de connaissances aussi bien en conception mécanique que dans le domaine à étudier. Cela afin d'éviter des problèmes éventuels liés aux expérimentations à réaliser.

La traçabilité de performances des organes et du MES au cours de son développement (dossiers 13 et 20) est indispensable pour une meilleure utilisation du produit. Elle permet de construire des documentations nécessaires à l'exploitation comme la notice d'emploi, le guide de maintenance, la perspective d'évolution du MES, la procédure de destruction après l'utilisation, le recyclage des composants.

2.3 Remarque sur les résultats de l'enquête

L'enquête soulève différentes facettes du problème à résoudre : celle de la conception, du compromis « qualité – coût – délai », de l'organisation, de la communication, etc.

Les difficultés purement techniques sont moins nombreuses que les difficultés de compréhension relatives au besoin de l'expérimentateur, au phénomène à étudier et à l'environnement de l'étude.

Pour optimiser le coût de développement d'un MES, il paraît stratégique de se concentrer sur le coût des composants standards et de la mise en chantier du prototype (59% du coût global de MES). Pour cela, la qualité de l'étude d'avant projet – conception doit être améliorée car c'est dans cette étape qu'on choisit les composants standards et définit le protocole de montage et d'étalonnage.

La communication entre le chercheur qui étudie le sujet et le concepteur qui développe le MES nécessaire pour l'étude doit être améliorée pour profiter des compétences et des connaissances de chacun.

Cette enquête soulève un manque de recherche méthodologique dans ce domaine. Le besoin d'une démarche adaptée aux problèmes de développement des MES est prépondérant.

3 Analyse des projets de développement des MES

En parallèle avec l'enquête présenté ci-dessus, nous effectuons des analyses sur plusieurs projets de développement des MES. Ayant la possibilité d'accéder aux différents projets à l'ENSAM, nous nous appuyons sur ceux ci pour en tirer un maximum de connaissances et d'expériences sur le développement des MES.

L'ENSAM est un établissement de recherche et d'enseignement supérieur. A l'ENSAM de Paris, chaque année il y a près de 50 doctorats délivrés, des centaines de projets de DEA et de Projets de Fins d'Etudes (PFE). L'orientation vers une formation par la recherche accroît le nombre de PFE au sein des laboratoires de recherches et la quantité de MES développés en interne. Le service prototypes participe à une centaine de projets chaque année dont une quinzaine d'entre eux concerne le développement des MES. Nos constatations sont issues de ce contexte.

Nos analyses comportent deux parties. Une analyse documentaire sur près d'une trentaine de rapports de projets a pour but d'identifier le mode de développement des MES et les résultats obtenus. Une autre analyse est effectuée sur quelques projets concrets auquel nous avons participé. Les expériences que nous obtenons de ces projets renforcent les conclusions de l'enquête (présentés au §2 de ce chapitre) et permettent d'enrichir nos connaissances sur les problèmes rencontrés au cours du développement des MES.

3.1 Analyse documentaire sur le développement des MES

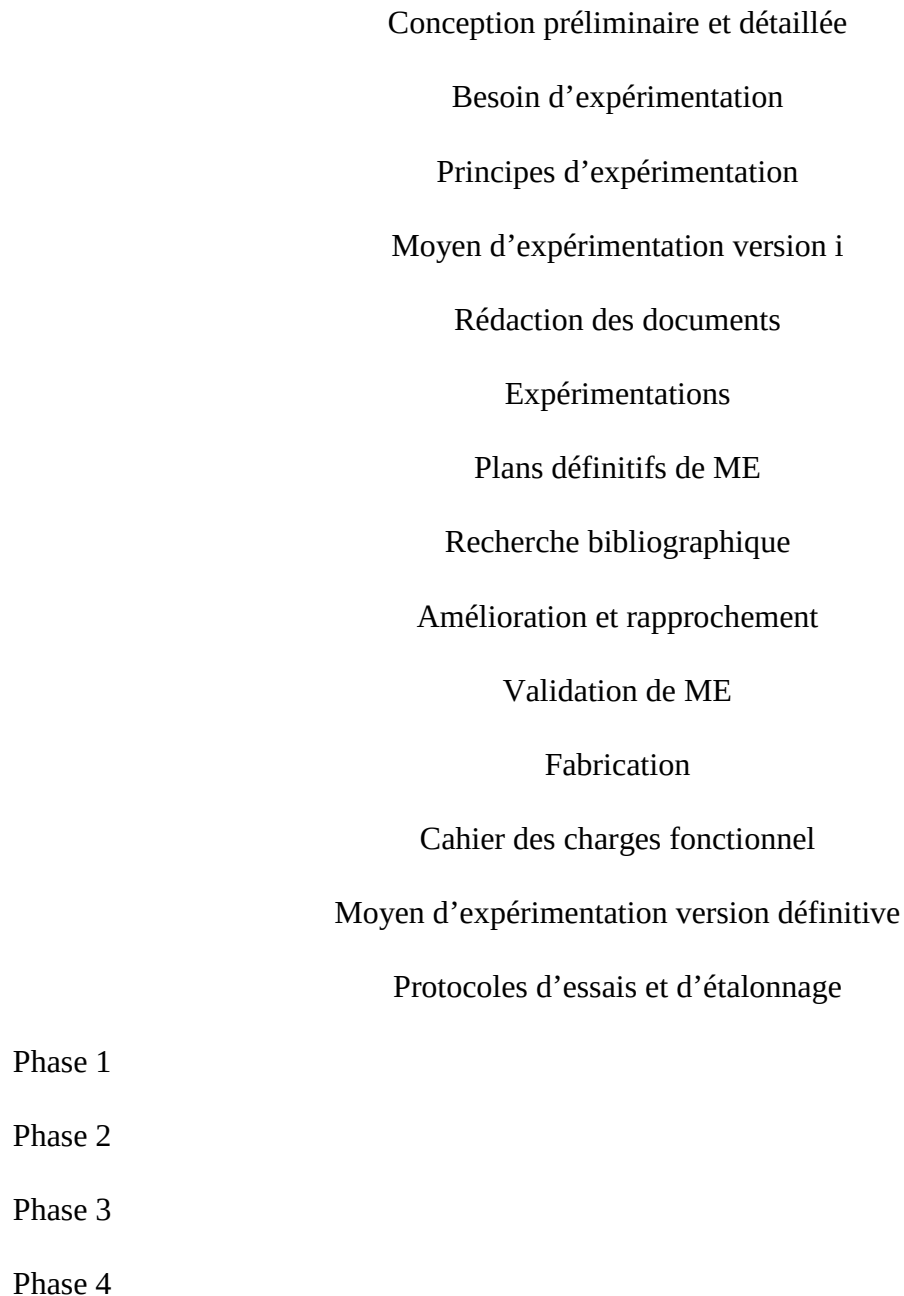
Dans les laboratoires de l'ENSAM, les modes de développement des MES ont certaines similitudes. Grâce à une analyse documentaire qui porte sur une trentaine de projets de développement de MES, nous synthétisons ces modes de développement sous forme d'un processus de développement. Une fois la décision de réalisation d'une expérimentation prise, le processus de développement du MES associé se compose de 4 phases :

4. 1. **Bibliographie - Principe de l'expérimentation.** Cette étude est réalisée par l'équipe projet. Dans cette phase, la recherche s'oriente vers des solutions utilisées pour des essais similaires déjà publiés dans le même domaine ou dans des domaines connexes. Le champ de recherche s'étend jusqu'au moment où l'on trouve la solution adéquate ou la solution la plus approchée. Elle sera utilisée comme base de réflexion pour rapprocher le besoin exprimé avec la solution choisie. L'amélioration se fait dans les deux sens en tenant compte des contraintes dues au contexte du laboratoire (le budget, le délai, les matériels disponibles). Le cahier des charges est défini à cette étape.
5. 2. **Réalisation du MES.** La conception et la fabrication sont réalisées durant cette phase. C'est la seule phase du projet où l'on fait intervenir des sous-traitants et des compétences externes en conception.
6. 3. **Test et étalonnage.** A cette phase, une fois que le MES est développé, on valide la solution technologique choisie. Dans beaucoup de cas, le bouclage vers une reconception ou

une amélioration s'avère nécessaire, surtout pour les MES de deuxième et troisième catégories (les MES de caractérisation et d'optimisation).

7. 4. **Exploitations du MES.** On définit le protocole d'essais, puis on lance la démarche expérimentale. Au cours des essais, on découvre encore des incompatibilités qui nécessitent des améliorations éventuelles.

Fig.8.



Processus de développement des MES

Synthèse des projets réalisés à l'ENSAM

La durée de vie du MES est souvent courte, en particulier pour les bancs d'essais. Le recyclage est une économie non négligeable. Les problèmes de la réutilisation et de la récupération des MES existants pour les nouvelles campagnes d'essais sont difficiles à cause du manque d'information sur leur performance et sur leurs limites d'utilisation. Ces problèmes ne permettent pas d'envisager des éventuelles améliorations, et donc la seule récupération possible reste celle des composants standards.

Ce processus est la synthèse d'une pratique courante dans beaucoup de laboratoires académiques. Il renforce les constatations de l'enquête sur le mode de développement des ME. Mais l'efficacité de cette démarche est limitée. C'est le cas dans de nombreux projets où le résultat final n'est pas satisfaisant.

Ci-dessous nous présenterons notre analyse qui porte sur certains projets concrets issue de nos expériences sur la conception des MES.

3.2 Analyse des projets concrets de conception des MES

Cette analyse s'appuie sur les projets auxquels nous avons participé dans la phase « réalisation du MES ». Notre position dans l'équipe de projet nous a permis de suivre l'évolution du projet et d'acquérir des informations pour notre analyse. Dans ce paragraphe, nous présentons les projets suivants :

8. 1. Le projet de « flambement des plaques sandwich » est un projet du type « reconception ». L'expérimentation fait partie de la famille des expérimentations de caractérisation qu'on utilise dans le cadre de la recherche fondamentale. Et le MES est une machine d'essais non standard.
9. 2. Le projet de « flambement conditionné des poutres composites » est intégré dans un projet de la Recherche et Développement dont le but visé est l'optimisation d'un nouveau procédé. L'expérimentation est à la fois de la catégorie de caractérisation et aussi de la catégorie de spécification. Le MES développé est un banc d'essais non standard.
10. 3. Le projet de la « micro platine » représente un projet du type « découverte » où on observe pour proposer des hypothèses sur le phénomène étudié. Le MES est un équipement « mixte », dont une partie est standard et l'autre partie non standard.

A travers ces trois projets, qui sont représentatifs de différents types de projets réalisés au cours des 5 dernières années (1997-2002), notre ambition est de synthétiser l'état de l'art du développement des MES dans les laboratoires académiques.

3.2.1 Projet « machines de flambement des plaques sandwich »

Contexte.

Le projet a pour but d'améliorer une machine existante afin de s'adapter à une nouvelle expérimentation, aux matières composites testées et aux efforts mis en jeu.

C'est une machine de flambement développée au LMSP (Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés) de l'ENSAM pour tester les plaques sandwich qui sont utilisées dans le domaine du bâtiment. Les études antérieures sur le sujet ont permis de réaliser deux prototypes (de 1994 à 1997), mais ces installations ne conviennent pas au besoin actuel de l'étude.

Le projet d'amélioration repose sur deux années 1997-1998 et 1998-1999. L'analyse de la machine existante permet d'identifier les problèmes provenant de la presse et de l'interface entre l'échantillon et le bloc de fixation. L'équipe de développement décide donc de reconfigurer la presse en raison du manque d'effort disponible et de changer le montage pour éliminer les influences des effets de bords sur le phénomène de flambement et de post flambement.

Conception du montage – les réussites et les imperfections.

1

2

On constate plusieurs décalages entre le modèle théorique d'essais (Fig. 7) et les modèles expérimentaux proposés dans les études antérieures (Fig. 8). Ces décalages conduisent à des résultats d'essais non validés [GRASS 98].

Fig.9. Modèle théorique.

Fig.10. Modèles expérimentaux.

1. Liaison encastrement 2.
Liaison pivot

Ce projet d'amélioration a pour but d'approcher le modèle théorique. L'analyse du phénomène de flambement permet de déterminer les exigences suivantes :

11. 1. Pour créer de la « compression pure » avant le flambement, le plan de l'effort doit coïncider avec le plan milieu de l'échantillon.
12. 2. Pour tenir compte de l'épaisseur non négligeable de l'échantillon, l'effort de compression doit être uniformément réparti sur la surface de l'extrémité.
13. 3. Pour le post flambement, l'axe de la liaison en rotation doit coïncider avec le plan de l'extrémité.
14. 4. Le frottement de la liaison en rotation doit être réduit le plus possible (négligeable par rapport à l'effort critique en flambement)

En tenant compte des exigences ci-dessus, on a écarté le modèle expérimental 1 à cause de la deuxième et de la troisième exigence. Le modèle expérimental 2 respecte les trois premières exigences mais il n'a pas permis de respecter la quatrième. Le frottement trop important dans la liaison pivot a faussé les résultats d'essais.

La solution retenue est de reprendre le modèle 2 en réduisant le frottement dans la liaison pivot (Fig. 9) par des galets à roulements (Photo 1).

Contre-poids

Demi-cylindre

Photo. 1. Partie pivot sur son support.

Fig.11. Modèle expérimental retenu.

Cette analyse a résolu le problème fondamental du montage. L'étalonnage et les premiers essais de validation du MES, en utilisant des matériaux connus, donnent des résultats très intéressants. La répétitivité est bonne.

Il y a encore quelques imperfections à faire évoluer. La première est liée à la difficulté de mise en œuvre. La précision de positionnement de l'échantillon influe directement sur les résultats d'essais à cause de la première exigence. Pour atteindre cette précision, le temps de la mise en position de l'échantillon est beaucoup trop long, elle nécessite une journée de préparation pour réaliser une dizaine de minutes d'essais. De plus, il subsiste un risque

d'échec non négligeable. Deuxièmement, le déplacement brutal au moment du flambement produit un effet dynamique sur les tiges des capteurs de déplacement qui risque de les endommager. Troisièmement, la masse du demi cylindre qui sert de pivot (Photo 1) conduit à une inertie importante. Elle perturbe le seuil de flambement de l'échantillon. En général elle fait augmenter légèrement l'effort critique.

La deuxième année [DOSSIN 99] est consacrée à l'amélioration du montage et à l'étalonnage de la machine. La mise au point reste encore longue mais la protection des capteurs est résolue. L'allègement du demi-cylindre n'est pas envisagée à cause du délai et du budget limité.

Remarque

L'analyse du modèle théorique et le choix du modèle expérimental conditionne la réussite du projet. Cette analyse permet à l'équipe d'identifier les exigences dont les projets précédents n'ont pas tenu compte.

La perturbation, liée à l'inertie de la partie « pivot », peut être identifiée en analysant le problème dynamique du flambement. Cette expérience démontre que l'analyse du phénomène à étudier est une étape très importante pour déterminer tous les aspects de celui-ci. Elle montre aussi qu'avant d'ignorer un effet quelconque, on doit s'assurer que son impact est négligeable. En cas de doute, des vérifications au cours de la conception du MES sont nécessaires.

Le dimensionnement du demi-cylindre est conditionné d'une part par la rigidité du montage et d'autre part par la limitation d'inertie en mouvement. Comme cela est indiqué ci-dessus, le surdimensionnement a favorisé la première performance et défavorisé la deuxième. L'analyse des impacts de la rigidité et de l'inertie sur la qualité des essais démontre que cette pièce pourrait être plus compacte pour rééquilibrer ces deux facteurs afin de trouver une somme de perturbations minimale.

La mise en œuvre complexe de l'essai est liée à la simplification des fonctions du montage. Cette simplification est imposée par des contraintes de délai et de budget. On s'aperçoit que le gain de temps et d'argent dans la phase de développement du MES ne compense pas les pertes de temps et d'argent dans la phase d'exploitation.

Ces contradictions sont des problèmes très courants dans la conception. Le compromis doit être basé sur l'optimisation de la performance globale du MES qui représente la qualité des essais et non pas la performance d'une fonction particulière ; surtout quand ces fonctions rentrent dans un conflit technique ou économique.

3.2.2 *Projet banc d'essais de flambement avec frottement conditionné de poutres composites.*

Contexte.

L'origine du projet est un problème industriel de la société France Télécom. Quand on utilise le nouveau procédé de pose par poussage, l'installation de réseaux de câbles optiques fait apparaître un certain nombre de problèmes. L'un d'entre eux est le frottement entre le câble et le conduit. Il entraîne une augmentation régulière de la force de poussage à l'origine du flambement et du post flambement du câble dans le conduit. Des modes de flambement

spatiaux complexes provoquent le blocage du câble. Afin de résoudre ce problème et d'optimiser le procédé de pose, le projet porte sur la simulation de ce phénomène de flambement.

Le projet a commencé avec une thèse de BOULHARTS [BOULHARTS 96] sous forme d'une collaboration entre le LMSP de l'ENSAM et le CNET de France Télécom. Il est poursuivi par une seconde thèse de RIVIERRE [RIVIERRE 00].

La première thèse exploite un banc d'essais développé au CNET qui, en grandeur nature, est fidèle à la réalité. L'objectif de ces essais est d'observer tous les cas de figures de flambement. Ce sont les expérimentations de la première catégorie (§3.3 du Chapitre 1). Les valeurs mesurées sont approximatives. Certains paramètres perturbateurs sont détectés mais on ne peut pas les maîtriser ou les mesurer [BOULHARTS 96], [PETIT 96]. Les observations sont utilisées pour proposer des hypothèses de modélisation et de simulation par éléments finis. Malheureusement, le premier modèle de calcul est difficilement exploitable car les résultats de calculs s'écartent de plus de vingt pour cent des résultats de l'expérimentation. Par contre, la comparaison des résultats, entre les essais des câbles en composite et ceux en matière homogène, est très utile pour les calculs d'homogénéisation de la section composite.

La thèse de RIVIERRE poursuit les travaux menés dans le cadre de cette étude. Pour améliorer la modélisation du procédé, la stratégie est d'abord d'étudier le phénomène fondamental de flambement conditionné, puis de l'appliquer dans le cas concret du poussage de câble.

Les expérimentations ont alors pour but de valider les hypothèses de modélisation du phénomène fondamental de flambement conditionné. Ce sont des expérimentations de la deuxième catégorie. Elles doivent valider quantitativement le modèle de calculs par éléments finis. Elles sont réalisées sur le banc d'essais de flambement avec frottement conditionné. Ce banc d'essais est développé au laboratoire « LMSP de l'ENSAM – Paris » par une équipe de projet [GRASSWILL 99]. Ce banc d'essais est le sujet de notre analyse.

Conception du banc d'essais-les réussites et les défaillances.

Après avoir consulté les expérimentations réalisées par le banc d'essais de la première thèse, et après une phase de description du phénomène de flambement envisagé, le cahier des charges est défini par l'équipe de développement [RIVIERRE 00],[GRASSWILL 99]. Le principe du banc d'essais est présenté dans la figure 9.

Fig.12.

Caméra

poutre

Goulot transparente

F

Capteur de déplacement

Capteur de force

Capteur de force

Rail linéaire

Portée d'éprouvette

Portée d'éprouvette

Bride de blocage

Equerre de poussée

Support de goulot

Actionneur

Principe du banc d'essai

Le modèle expérimental est la compression de la poutre dans un conduit cylindrique. La poutre est montée sur le banc d'essais grâce à deux « portées d'éprouvette » qui permettent d'obtenir les liaisons souhaitées (encastremements, pivots ou rotules). Ces deux « portées d'éprouvette » sont guidées par un rail linéaire de 2m de long. A l'aide d'un actionneur, on applique un effort axial F sur une extrémité de la poutre et on bloque l'autre extrémité par la « bride de blocage ». Cet effort va augmenter jusqu'au seuil d'instabilité de flambement et de post-flambement. L'espace de flambement est conditionné par le conduit transparent. La caméra, avec sa capacité de prise d'images à très grande vitesse (300 images par seconds), permet d'observer et d'enregistrer les points de changement d'état. Les capteurs de force permettent de mesurer les efforts critiques. Le capteur de déplacement permet de contrôler le déplacement d'une extrémité de la poutre afin d'assurer une vitesse de déplacement constante.

Les paramètres d'entrées sont les caractéristiques physiques et géométriques de la poutre (diamètre, longueur, module d'Young), du conduit (diamètre intérieur) et des conditions d'attache du câble : liaison pivot, encastrement et rotule.

Les paramètres de sortie sont les efforts enregistrés autour des points critiques de flambement et de post-flambement, la configuration de chaque mode de flambement (sinusoïdal et hélicoïdal), ainsi que le déplacement.

Avec ce banc d'essai, on ne peut pas détecter ou maîtriser certains facteurs perturbateurs. Le poids de la poutre provoque de la déformation en flexion qui accentue le déséquilibre de la poutre. Pour supprimer cette influence, le conduit doit tenir la poutre sans induire le moindre effort supplémentaire. Et donc, sa surface intérieure doit être parfaitement tangente avec la surface extérieure de la poutre. Malheureusement, cette contrainte n'a pas été précisée dans le cahier des charges. Le conduit est mis en place par des supports dont la précision de réglage est faible (Photo 2 et Photo 3) et dont la position est vérifiée à l'œil nu.

Photo. 2. Supports de conduit [GRASSWILL 99].

Photo. 3. Supports de conduit améliorés (photo en 2003).

L'influence de cette imprécision n'est pas mesurable. Pour s'affranchir de l'influence imprévisible, dans plusieurs essais on positionne le conduit de façon à ce qu'il ne touche pas l'éprouvette. Le problème du poids n'est alors pas résolu.

Les éprouvettes ne sont pas toujours parfaitement cylindriques. Ce défaut des éprouvettes en couplage avec l'effet du poids, perturbe le plan de flambement et l'effort critique. Ces facteurs sont des causes de dispersion des résultats dans les essais. Exemple dans la Figure 4.20 [VERIERRE 00], l'effort critique de claquage pour passer à la 2^{ème} hélice, varie entre de 20N à 37N.

Le banc d'essai lui-même crée des perturbations sur le phénomène à étudier. Par exemple, l'inertie importante des portées d'éprouvette perturbe le phénomène au moment du changement brusque (claquage) de la configuration du flambement. De plus, ce moment d'inertie n'est pas uniforme selon l'orientation du plan de flambement et l'impact de cette perturbation est donc impossible à estimer.

Un manque d'analyse du modèle expérimental, dans la phase de rédaction du cahier des charges, conduit à des paramètres fonctionnels qui s'appuient sur des contraintes incohérentes. La longueur de l'éprouvette est limitée car elle dépend de l'encombrement du banc qui est imposé par l'espace disponible dans le laboratoire. La charge maximum est prévue pour des câbles en composite. En réalité, pour faire apparaître toutes les configurations de flambement, les éprouvettes doivent avoir des dimensions et des rigidités qui respectent une certaine proportion.

Dès lors, le phénomène n'est plus le comportement des câbles composites mais celui du flambement des câbles en matière homogène. Pour retrouver un phénomène équivalent les expérimentateurs ont choisi des échantillons dont la rigidité est plus faible que prévu. Les capteurs permettent une mesure jusqu'à 2000N avec une précision de $\pm 0,5 \%$ de l'E.M.(Etendue de Mesure), c'est à dire $\pm 10N$. Ils sont utilisés pour mesurer des efforts inférieurs à 200N. L'imprécision de plus de $\pm 0,5 \%$ (10N) provoque une erreur qui vaut en réalité $\pm 5 \%$ de l'EM effective ($10/20 \times 100\%$). Des capteurs moins chers avec une limite de mesure de 200N auraient, en réalité, permis un meilleur résultat. Une analyse identique conduit pour l'actionneur à la même conclusion.

Le portique de la caméra est un profilé d'aluminium de 1,4 m de haut et de section 40x40 mm. Elle est reliée avec le banc par des équerres. Cette structure pas suffisamment rigide ne permet pas d'éviter les vibrations provenant du moteur et du choc lié au claquage de l'éprouvette. Elles réduisent la qualité d'image. Pour plus de cohérence, une caméra de cette qualité demande un support beaucoup plus rigide.

La conception des portées d'éprouvette, qui regroupent les trois fonctions rotule, semi-encastrement et encastrement, n'est pas optimale. Le concept compliqué engendre en même temps l'augmentation du poids et la diminution de la précision de positionnement. Selon l'analyse ci-dessus, l'inertie de cet organe doit être minimisée.

Le manque de dispositif de réglage entre la génératrice du conduit et le rail est, pour la compression pure, énormément plus pénalisant que l'imprécision de linéarité de 0,1 mm en déplacement des chariots assuré par le rail. Un guidage moins cher, au profit d'un système de réglage rudimentaire, aurait permis de mieux approcher « la compression pure ».

Les organes achetés (vérin + commande, capteurs, rail linéaire, caméra, logiciel, PC) ont des performances surabondantes et coûtent 14.400 euros. Par contre, les organes stratégiques, les portées d'éprouvette, l'équerre de poussée, les supports du conduit et le support de la caméra ne coûtent que 3000 euros. Avec ce budget limité, la plupart des pièces sont fabriquées avec une qualité insuffisante. Les résultats expérimentaux montrent que les perturbations engendrées par ces organes, à cause du concept multifonction trop compliqué et de la qualité de fabrication insuffisante, dépassent largement la précision des systèmes d'actionneur et les précisions de mesure des capteurs et de la caméra.

Pour conclure, les résultats de mesure et d'observation ne correspondent pas aux résultats de calculs théoriques. Les écarts varient de 15,7% à 29,2% pour une liaison d'encastrement, et de 4% à 10% dans le cas de la liaison de rotule [VERIERRE 00]. Par conséquent, l'étude de la modélisation ne peut pas être validée.

Remarque

La solution utilisée s'inspire du précédent MES [BOUDHARTS 96], [PETIT 96] avec quelques modifications. Malgré les efforts d'amélioration, le banc d'essais ne répond pas à la nouvelle problématique, celle de la recherche des lois générales du flambement conditionné.

Le projet de développement du MES se déroule en parallèle avec l'étude de modélisation. La communication entre les deux équipes est réduite à l'échange des recommandations au début du projet. Les informations nouvelles au cours de l'étude ne sont pas mises en commun. L'exemple du changement du type d'éprouvette explique l'incohérence entre le besoin et le cahier des charges.

Comme précisé dans le §3.1, nous ne sommes intervenus qu'à partir de la phase de réalisation de la machine. Les échanges se sont limités aux sous-ensembles développés par le service prototypes. Ce manque d'implication en amont du projet ne nous permet pas de justifier les choix techniques et de valider ses impacts sur le produit final.

L'absence de définition des objectifs de l'expérimentation et d'analyse des modèles théoriques et expérimentaux ne permet pas de compléter et de préciser le cahier des charges. Ce banc d'essai n'a pas répondu au besoin des chercheurs. Il n'a pas permis les avancées scientifiques souhaitées.

La contrainte budgétaire est une contrainte principale qui influe sur la qualité du MES à développer. Le choix non justifié de certains composants standards dans ce MES a pénalisé le budget disponible pour le développement optimum des autres parties du produit. L'incohérence en répartition du budget entraîne l'incohérence en terme de performance entre les organes. Le produit final n'est pas optimal.

3.2.3 Micro-platine de traction.

Contexte.

Dans le cadre de la recherche en collaboration entre le LM3 (Laboratoire de Microstructure et Mécanique des Matériaux) et le LTVP (Laboratoire de Transformation et Vieillessement des Polymères) de l'ENSAM. La problématique est l'étude des polymères cristallins (une phase amorphe et une phase cristalline) comme le polypropylène.

Ces matières ont des comportements mécaniques liés à la texture de la phase cristalline. Afin de comprendre le mécanisme de l'influence de cette morphologie sur les comportements mécaniques, on cherche à caractériser qualitativement et quantitativement les modes de déformation et d'endommagement des structures cristallines. Le principe d'essai retenu est l'application d'une traction pure sur les échantillons de polypropylène. Il y a deux problèmes qui empêchent l'utilisation des machines de traction conventionnelle :

- L'observation in situ des déformations au niveau de la microstructure nécessite un microscope performant. L'installation de ce matériel sur la machine de traction du laboratoire n'est pas possible.
- Dans une pièce en polypropylène, lors de sa fabrication, les gradients de température pendant le refroidissement entraînent une microstructure hétérogène et un comportement mécanique anisotrope. La fabrication des échantillons de taille standard implique forcément ce défaut. Hors, pour l'étude, on a besoin d'échantillons de matière homogène, au moins dans la zone d'observation.

L'utilisation des échantillons sous forme de film très fin permet de remplir ces conditions et de rendre possible l'observation in situ, au microscope, d'une microstructure relativement homogène. Cette expérimentation particulière nécessite des moyens d'investigation spécifiques.

Deux équipes de projets sont formées : un pour le travail de recherche expérimentale [GUILLERME 99] et l'autre pour la réalisation du MES [CHAUVIN 99]. Le projet de développement de MES a pour objectif la fabrication d'une micro-platine de traction destinée à être placée sous le microscope optique existant dans le LM3.

Conception de la machine – les réussites et les imperfections.

Le cahier des charges comporte trois rubriques :

15. 1. Le contexte du laboratoire : les contraintes liées au budget, au délai et à la qualité des résultats
16. 2. Les milieux extérieurs : les contraintes liées au microscope (l'encombrement, la zone d'observation sur le microscope) et à l'éprouvette(la taille de l'éprouvette)
17. 3. Les fonctions principales : l'effort à fournir et à mesurer, la course maximum, la gamme de vitesses, la stabilité de la vitesse de déplacement.

Basé sur le principe des machines de traction existantes, l'équipe projet décide de décomposer la machine en 3 sous-ensembles principaux : l'actionneur, la transmission- transformation de mouvement et les capteurs.

Le premier sous-ensemble développé est l'actionneur car il doit répondre à plusieurs contraintes et conditionne les autres sous-ensembles. Après une phase de déduction, les deux types de moteurs électriques : MCC(moteur à Courant Continu) et MPP (Moteur Pas à Pas) sont susceptibles de répondre au cahier des charges. Le moteur électrique « pas à pas » est choisi en consultant l'avis des fournisseurs de moteur. La précision du moteur est améliorée de 200 pas/tour à 16000 pas/tour grâce à une carte « SIMPA Micropas » en option. Un réducteur planétaire 1/200 est équipé pour avoir une vitesse de sortie faible.

Selon le cahier des charges, la plage de l'effort à mesurer est de 200N et la mesure doit être la plus précise possible. Deux solutions sont envisagées : un capteur de force ou une jauge de déformation associée à des butées mécaniques. La jauge de déformation est facile à mettre en œuvre, elle donne de bons résultats de mesure, elle n'est pas coûteuse à l'achat et au montage mais elle oblige un étalonnage et un entretien régulier. Le capteur de force est, par contre, garanti par le constructeur, étalonné en usine et la marge de sécurité est très grande. Les jauges sont alors écartées au profit des capteurs de force.

Pour la transmission - transformation, on utilise un système vis - écrou qui est le principe le plus utilisé dans les machines de traction existantes. En tenant compte de la contrainte liée à l'observation sur microscope, la traction doit être symétrique. Les deux mors sont donc entraînés par un système de vis - écrou constitué de deux parties : l'un à pas à gauche et l'autre à pas à droite pour obtenir une traction symétrique. Le principe de la machine est présenté sur la Fig. 10.

Fig.13.

Mo

Cf

Mo : Moteur

Cf : Capteur de force

Principe de la machine

A cause du décalage nécessaire de l'axe de la force, la structure du mécanisme a été rendue symétrique. La photo 5 ci-dessous présente la machine Micro-platine (version 1999).

capteur de force

Moteur et réducteur

Transmission par courroies crantées

Transmission par courroies crantées

Transformation de mouvement par vis-écrous

Transmission par courroies crantées

Transformation de mouvement par vis-écrous

Photo. 4. La micro-platine développée par Chauvin [CHAUVIN 99].

En cours de réalisation, on s'aperçoit que le capteur de force est trop lourd. Afin d'encaisser la flexion du support, cette solution impose l'utilisation des guidages à ses deux extrémités. Cette structure crée un frottement intégré dans la mesure réalisée par le capteur.

Le principe de traction par deux systèmes « vis-écrou » oblige une synchronisation parfaite. La transmission par courroies crantées ne permet pas de l'obtenir en particulier au moment du

démarrage. La raideur faible du système de courroies crée un décalage en rotation entre les deux vis. Elle est aussi une source potentielle de vibration.

A cause d'un budget relativement faible, les éléments « vis-écrou » et les guidages sont réalisés spécifiquement avec un niveau de qualité élevé difficile à obtenir par des étudiants sur des machines peu précises. Cette difficulté s'ajoute d'une part à la synchronisation des deux écrous et d'autre part à la stabilisation du mouvement de traction.

L'utilisation de cette machine (version 1999) par une équipe de projet [GUILLERME 99] a donné des résultats d'observation, par microscope, satisfaisants. Mais les résultats mesurés par le capteur de force sont très éloignés des calculs analytiques. On ne peut pas tirer de conclusions d'ordre quantitatif à partir des essais effectués sur ce MES. Les imprécisions dans la fabrication des composants spécifiques ne sont pas mesurables avec les moyens du bord. De plus, l'étalonnage est impossible. Les paramètres perturbateurs ne sont donc pas maîtrisables. Des améliorations sont nécessaires pour continuer l'étude.

Remarque

Dans la conception, le changement d'échelle n'appelle pas uniquement un changement de dimensionnement. Les phénomènes qui sont connus à une échelle donnée, ne se produisent pas à l'identique à une échelle réduite. Beaucoup de paramètres négligeables deviennent non négligeables. Dans cette micro-platine, le problème du poids du capteur et du frottement dans les guidages en sont les témoins. Par ailleurs, et à priori, le porte-à-faux est plutôt déconseillé en construction de machines. Mais dans notre cas, le défaut de synchronisation créé par les mécanismes nécessaires à une architecture symétrique perturbe plus le résultat que le porte à faux et le non-alignement de la force de traction engendrée par une asymétrie.

Le projet de développement de la machine est découpé en plusieurs sous – projets de développement de sous – ensembles. Donc, l'incohérence éventuelle en terme de performances n'est pas détectable pendant la conception.

En réalité, le manque de budget nécessaire pour l'achat de composants standards (comme des guidages ou des vis à billes) est un faux problème. La stabilité du mouvement en est un. Si on opère un rééquilibrage en supprimant la carte « SIMPA Micropas » au profit de l'achat des vis à billes (les coûts sont équivalents), la qualité du mouvement serait meilleure et le temps de réalisation des composants spécifiques serait réduit.

On rencontre à nouveau le problème de non équilibre dans la répartition du budget qui entraîne le déséquilibre dans les performances. La performance globale du produit n'est pas optimale.

Ce projet fait émerger un protocole d'expérimentation nouveau qui nécessite d'être standardisé. Pour continuer la recherche il est donc nécessaire d'améliorer la Micro-platine en vue d'expérimentations ultérieures. Le développement de la version ultérieure fait l'objet de l'application d'une future démarche.

3.3 Synthèse des expériences acquises sur la conception des MES.

Comme dans beaucoup de grandes écoles, le développement des MES à l'ENSAM subit différentes contraintes. Le délai de développement de MES est conditionné par le délai du

Projet de Fin d'Etudes (PFE), de la publication ou du projet de thèse. Dans le cadre des contrats industriels, ce délai est encore plus strict. La mauvaise estimation du temps de développement des MES, le manque d'anticipation, le manque d'expérience sont à l'origine d'une certaine forme de précipitation. Le budget limité s'ajoute aux difficultés de conception des MES. Ainsi, le développement de MES se situe entre tâtonnement et reconceptions itératives.

Les projets de développement des MES que nous citons ci-dessus, ont des points communs. Ils rejoignent les résultats de l'enquête du paragraphe §2 de ce chapitre. Bien qu'ils soient dans le contexte de l'ENSAM, les problèmes rencontrés sont représentatifs de ceux des laboratoires de recherche.

Le développement des MES présente des problèmes comparables au résultat de l'enquête. On rencontre les défauts suivants :

- • La mauvaise conception : les deux premières versions de la machine de flambement des plaques sandwich, le banc d'essais de flambement avec frottement conditionné des poutres composites
- • La mise en œuvre complexe : la version finale de la machine de flambement des plaques sandwich,
- • L'étalonnage difficile ou inexistant : la micro-platine (version 1999)
- • La précision insuffisante : le banc d'essais de flambement avec frottement conditionné des poutres composites, la micro-platine (version 1999)
- • La mauvaise répétitivité : le banc d'essais de flambement avec frottement conditionné des poutres composites
- • Le coût d'exploitation élevé : la version finale de la machine de flambement des plaques sandwich
- • L'influence trop importante des facteurs perturbateurs : concerne les trois MES

L'analyse des projets de développement des MES à l'ENSAM nous permet d'étudier plus en détail leur conception. On trouve des MES, dont certaines performances locales sont surabondantes. Elles rendent les MES non optimaux en terme de rapport coût/performance. La micro-platine, le banc d'essais de flambement des poutres composites en sont des exemples.

L'origine de ces problèmes réside dans le mode de développement. Il se retrouve dans chaque phase de la démarche de développement des MES présentée ci-dessus :

Phase 1 : Bibliographie – principe d'expérimentations - élaboration de CdC

Le choix du principe d'essais est souvent basé sur des études précédentes sans se soucier du contexte nouveau ou de la problématique nouvelle. Dans le projet « banc d'essais de flambement des poutres composites », on copie le principe du banc d'essais précédent de la catégorie des MES d'observation. Ce principe n'est pas adapté à la modélisation d'un phénomène générique tel que le flambement conditionné qui correspond à la catégorie des MES de caractérisation. Dans le projet « Micro-platine », on s'appuie sur le principe des machines de traction standards sans se rendre compte qu'un changement d'échelle peut engendrer des phénomènes nouveaux qui perturbent le bon fonctionnement du MES.

Un cahier des charges incomplet peut modifier le phénomène à étudier. Par exemple, dans le projet « banc d'essais de flambement avec frottement conditionné des poutres composites » la contrainte de colinéarité entre l'éprouvette et le goulot n'a pas été pris en compte. Dans cette expérimentation, le phénomène de « flambement conditionné » a modifié la condition prévue. Dans le projet de « flambement des plaques sandwich », l'effet dynamique n'est pas considéré comme une contrainte à respecter.

Dans le cahier des charges, les critères d'appréciation des fonctions ne sont pas toujours précisés. On trouve souvent des termes comme « parfaitement parallèle » ou « compression pure » ou « parfaitement stable » qu'on n'a pas quantifié par des valeurs associées. L'ordre d'importance des fonctions n'est pas établi de façon rigoureuse. En fonction d'un budget limité, les concepteurs de MES ne trouvent pas de repère pour équilibrer leur investissement.

Phase 2 : Réalisation.

Dans les trois projets ci-dessus, la conception des MES a conduit à séparer le produit en plusieurs sous-ensembles : les composants achetés (des actionneurs, des capteurs, des cartes d'acquisition des données, PC, etc. qui existent dans les catalogues) et les éléments fabriqués (des organes fonctionnels spécifiques, des supports, des pièces intermédiaires etc.). En terme de performances, de qualité, et de coût, les premiers sont souvent choisis trop tôt sans souci de leur éventuelle incohérence avec les secondes.

La précision de mesure est identifiée par la précision des capteurs. Or, en réalité, beaucoup de paramètres externes ou internes au MES peuvent intervenir dans la mesure, c'est le cas de la micro – platine par exemple.

Du point de vue économique, les pièces spécifiques ont souvent un rapport « qualité/coût » faible par rapport à des composants standards qui sont fabriqués en grande série. Pour vérifier certaines caractéristiques techniques, la fabrication des pièces spécifiques nécessite des moyens de contrôle dont les laboratoires ne sont pas toujours équipés. Ce manque peut devenir la cause de non-qualité du MES. Un exemple, dans la micro – platine, les guidages usinés spécifiquement ne permettent pas d'avoir un état de surface et une précision aussi bons que les guidages standards qu'on trouve sur le marché.

Phase 3 : Etalonnage.

L'étalonnage des capteurs ne signifie pas l'étalonnage du MES. Il y a des MES qui n'ont pas de protocole d'étalonnage comme le banc d'essais de flambement des poutres ou la micro – platine. La seule vérification possible est la répétitivité des résultats d'essais. Ce n'est pas suffisant pour assurer le bon fonctionnement d'un MES.

Phase 4 : Exploitation.

Les jeunes chercheurs ont tendance à idéaliser les résultats d'expérimentation. La précision des capteurs ne représente pas forcément la précision du MES. Si la phase d'étalonnage ne permet pas de certifier la qualité du MES par rapport au cahier des charges, les résultats d'essais ne peuvent pas être validés.

Dans de nombreux projets de développement des MES, la démarche (Fig. 5) employée par les équipes de développement n'est pas pertinente pour résoudre les problèmes rencontrés. De

plus, une validation qui n'est effectuée qu'après la fabrication du MES n'est pas satisfaisante. Le manque de validation ou de justification des choix entre chaque phase de la démarche cumule des risques d'erreur, qui souvent imposent des reconceptions successives.

4 Conclusion – problématique de terrain expérimental

Les travaux présentés ci-dessus permettent d'identifier les difficultés spécifiques au développement des MES. En fonction du contexte de développement, ces problèmes auront un impact important ou plus modéré.

4.1 Contexte de développement des MES

Selon la typologie des projets en conception de produits [AFITEP 91], les projets de développement des MES [Enquête LUONG 01a] entrent dans la catégorie des petits projets. D'après Richard E. WESTNEY dans son ouvrage sur la gestion des petits projets, « les petits projets sont réalisés avec des équipes de projet rarement à plein temps, autrement dit avec des moyens humains et matériels partagés entre différents projets » [WESTNEY 1991].

De plus, chaque projet de développement peut être réalisé en interne et/ou de façon externe au laboratoire. Il existe de nombreuses possibilités intermédiaires entre le développement entièrement en interne et le développement entièrement sous-traité.

Un développement interne au laboratoire est souvent synonyme de manque de moyens techniques, de manque de compétences pluridisciplinaires et de connaissances en conception limitées. Les acteurs de la conception ont par contre certaines expériences spécifiques. C'est dans le contexte des laboratoires de recherche publics que cette situation est la plus fréquente. Les chercheurs doivent avec un budget annuel prédéfini permettre les meilleures avancées scientifiques. Dans ce contexte borné par le « coût objectif » l'optimisation du rapport « coût/performance » est stratégique.

Dans le développement des MES entièrement sous-traités, on rencontre des difficultés de communication entre le concepteur et le chercheur. Le transfert des connaissances et les échanges de point de vue entre les acteurs principaux ne sont pas suffisamment structurés.

4.2 Problèmes constatés

Les MES ont certains défauts caractéristiques liés à leur contexte de développement. Nous constatons deux problèmes majeurs : le décalage par rapport au besoin expérimental et la non-optimisation en « coût, qualité, délai ».

4.2.1 Décalage par rapport au besoin expérimental

Les défauts liés au décalage entre le phénomène expérimental souhaité et le phénomène réalisé par le MES sont fréquemment qualifiés de : « mauvaise conception », « MES inadaptés », « incertitude de mesure », « influence trop importante des facteurs perturbateurs », etc.

D'autres défauts sont liés au manque de performance comme par exemple : précision insuffisante, mauvaise répétitivité, étalonnage difficile ou inexistant, sensibilité trop faible, etc.

D'après l'enquête, la majeure partie des défauts est liée à une mauvaise définition du Cahier des Charges.

Des cahiers des charges incompréhensibles

La communication entre les chercheurs et les concepteurs est rendue difficile par une absence de « structure » dans les échanges et une différence de vision sur le sujet. Le décalage entre les champs de connaissances du chercheur et du concepteur conduit à de nombreuses incompréhensions. Le concepteur ne peut acquérir dans un délai court toutes les données du problème expérimental (connaissances du chercheur sur le sujet de la recherche). Il en va de même pour les chercheurs qui n'acquièrent que très progressivement une expérience spécifique en conception. Il faut redonner au cahier des charges son véritable rôle d'outils de communication.

Des cahiers des charges incomplets et imprécis

Selon l'enquête, le Cahier des charges est souvent présenté exclusivement sous forme d'une description de l'expérimentation à réaliser. On en déduit le principe de fonctionnement du MES, en ignorant les contraintes et les exigences liées au phénomène à étudier. Les influences de l'environnement ne sont pas prises en compte. Les solutions susceptibles de respecter un cahier des charges descriptif sont nombreuses. Le manque d'information rend la sélection impossible et pour des critères de coût et de délai, les solutions retenues sont inadaptées.

Le phénomène étudié est peu connu. Ce caractère, intrinsèque au sujet de l'expérimentation, a d'énormes répercussions sur le cahier des charges. L'analyse des milieux extérieurs n'est pas assez fine pour permettre la meilleure prise en compte possible des éventuelles interactions du milieu extérieur avec le sujet expérimental. En l'absence d'analyse, leur caractère plus ou moins imprévisible va rendre très difficile l'énoncé des fonctions à remplir par le MES.

En lisant les Cahiers des charges des projets développés à l'ENSAM, on trouve très fréquemment des expressions telles que « parfaitement aligné », « absolument identique », « une précision la plus importante possible » qui ne constituent pas des valeurs qualitatives exploitables. La demande extrême des chercheurs est compréhensive, mais un modèle expérimental conforme au modèle théorique souhaité, qui s'affranchirait de toutes les contraintes au sens général, n'est souvent pas réalisable avec les techniques existantes. Il faut ajouter à ces difficultés qu'un manque d'identification des niveaux d'erreur admissibles impute l'étude de toute possibilité d'optimisation du rapport coût/performance en vue des avancées scientifiques potentielles.

4.2.2 Non-optimisation en « coût, qualité, délai »

Ce constat est essentiellement tiré de l'analyse des projets concrets à l'ENSAM.

Un cahier des charges incomplet et imprécis n'est pas la seule source de non-qualité des MES. En analysant les performances locales, qui permettent d'assurer une même performance globale du MES, on s'aperçoit d'une certaine incohérence. Elle réside dans la répartition du budget utilisé pour atteindre ces performances locales et le gain en performance globale qu'elles apportent. **Elle est la conséquence d'une absence de corrélation entre la performance locale, la performance globale et la répartition du budget.** Plus la contrainte budgétaire est importante, plus cette absence de corrélation influencera l'efficacité du MES.

Tous les problèmes évoqués démontrent la complexité du développement des MES. Cependant, le mode de développement des MES reste intuitif et géré au cas par cas. Il paraît peu efficace face aux difficultés dans la conception de MES. C'est le manque d'une méthode de conception adaptée qui en est la cause.

4.3 Manque de méthodes de conception adaptées

Devant les caractères spécifiques du MES et de son contexte de développement, **les concepteurs de MES n'utilisent pas les méthodes de conception existantes**. Leur argumentation s'appuie sur deux prétextes :

- Les contraintes de coût, de délai et le manque d'expérience dans l'application des méthodes existantes tout particulièrement pour les petits projets de développement de MES.
- L'inefficacité des méthodes existantes face aux difficultés de conception exposées ci-dessus.

Après enquête et analyse du mode de développement actuel des MES, et devant l'absence de démarche formelle, nous nous interrogeons sur la nécessité d'une méthode de conception spécifique.

4.3.1 Besoin d'une méthode de conception pour les MES

Il est vrai que les laboratoires, qui travaillent depuis longtemps dans les mêmes domaines de la recherche, connaissent bien leur champ disciplinaire expérimental. L'expérience acquise au fil du temps permet aux chercheurs de compenser le vide méthodologique apparent. Ils exploitent des « habitudes non formalisées ». L'application d'une méthode souvent plus lourde qu'une démarche propre à l'entreprise renforce l'idée d'une perte de temps.

Dans les domaines de recherche émergents ou dans le développement des produits nouveaux, la situation est plus critique car on s'aperçoit qu'en absence d'expérience, de nombreuses erreurs sont commises. Nos analyses ci-dessus en font la démonstration. Elles peuvent augmenter les délais et les coûts des projets de la Recherche et du développement. Une méthode de conception adaptée au développement des MES pourrait être la solution pour pallier cette absence d'expérience et éviter les successions de reconceptions. Nous portons volontairement notre intention à la phase de conception et non pas à la phase d'industrialisation car le développement des MES est souvent unitaire.

La grande diversité des MES semble s'opposer, selon les chercheurs, à la possibilité d'appliquer une méthode commune [LUONG 01a]. Mais notre analyse ci-dessus (chapitre 1 et 2) démontre que la majorité des MES ont des caractéristiques communes et que leur développement présente une problématique commune. Ces similitudes nous permettent de supposer **qu'une démarche méthodologique commune peut être envisagée**.

4.3.2 Objectifs visés d'une méthode de conception des MES

La nécessité d'une méthode de conception dédiée au développement des MES est, selon nos analyses, bien réelle. Pour mener à bien un projet de développement des MES, cette méthode doit répondre aux objectifs suivants :

La contrainte de budget annuel couramment présentée peut se traduire par **la nécessité d'une conception pour un coût objectif mais évolutif**.

Des pratiques nouvelles, faciles à mettre en œuvre, doivent permettre une conception qui **répond aux espérances du chercheur en terme d'avancées scientifiques**.

Dans le cadre d'une production souvent unitaire, le respect des délais et surtout des coûts n'autorise pas, la construction des versions prototypes. Il est donc, essentiel de faire « **bon du premier coup** », et de prévoir si possible un potentiel d'amélioration ou d'adaptation liée à l'évolution de la recherche expérimentale.

4.4 Problématique du terrain expérimental

Malgré leur rôle important pour faire avancer la recherche, la qualité des services rendus par les MES n'est pas toujours satisfaisante. On rencontre des difficultés en terme de ressources financières, de délais, de compétences, d'organisation, etc. Son développement reste un maillon faible du processus de recherche et développement.

Nous constatons que la plupart des MES doit subir une succession de conception et de reconception. En conclusion, la problématique est la suivante :

Comment concevoir des MES « bon du premier coup », les optimiser en vue d'apporter un service pertinent à la recherche et au développement ?

Les analyses ci-dessus, qui s'appuient sur l'enquête et les projets concrets de développement des MES, permettent de décliner cette problématique de terrain expérimental en trois questions d'ordre opérationnel :

- • Comment rédiger un cahier des charges complet, précis et compréhensible ?
- • Comment éviter l'incohérence dans la répartition du budget et des performances dans la structure des MES ?
- • Comment prendre en compte le contexte de développement et les caractères spécifiques des MES ?

Nous cherchons une réponse à ces questions dans le domaine méthodologique car de nombreux problèmes similaires y sont traités. Il reste à statuer sur l'éventuelle adaptabilité, aux moyens d'expérimentation, des méthodes existantes. En cas d'adaptation impossible, à constituer les éléments nécessaires pour le développement d'une nouvelle méthode de conception qui leur correspond. Ce travail fait l'objet du chapitre suivant.

chapitre 3

Cadre théorique de référence - Problématique de la recherche

Notre ambition est d'identifier le cadre théorique de notre recherche méthodologique. Nous cherchons les méthodes et outils de conception existants susceptibles de résoudre des problèmes semblables aux nôtres.

Tout d'abord, une étude bibliographique sur les démarches de l'expérimentation nous permet de positionner le MES dans un projet expérimental. Le développement des MES a pour objectif le support à la réalisation des expérimentations. L'expérimentation est donc le besoin fondamental, le but final de MES. C'est pour cette raison que nous étudions dans le premier paragraphe de ce chapitre les références méthodologiques de l'expérimentation. Cette étude nous permettra de connaître le processus d'expérimentation, la position du développement des MES dans un projet expérimental, les données d'entrée pour le développement du MES ainsi que les attentes des chercheurs à ce produit.

Pour la phase de développement des MES proprement dit, nous avons élargi le champ de notre recherche bibliographique vers le thème plus global des « méthodes et outils méthodologiques en conception » utilisés pour le développement de produits.

Dans ce chapitre, nous établirons une étude bibliographique qui s'étend de l'approche méthodologique dans la conception, jusqu'aux outils d'aide à la conception en passant par la modélisation du processus et les différentes méthodes de conception. Ce travail nous permet à partir d'une vision globale sur l'existant, d'analyser les avantages et les inconvénients des méthodes afin d'identifier les éléments propices qui constituent notre cadre théorique de référence.

Dans le chapitre précédent, l'identification des caractères des MES, de leur contexte de développement et l'analyse du besoin méthodologique pour leur développement permet d'identifier les critères de notre recherche bibliographique :

- Les MES sont des produits nouveaux, nous limitons notre recherche dans le cadre de la conception des produits nouveaux.
- Les MES sont des produits du type « système » les approches des systèmes sont donc nécessaires.
- Dans le contexte de développement des laboratoires de recherche, les activités de conception des MES ne sont pas les activités principales donc il n'est pas question de mettre en cause l'organisation du laboratoire. Les méthodes de management ne sont pas l'objectif de notre recherche.
- Le MES est souvent développé à l'unité ou en très petite série. Nous ne cherchons donc pas les méthodes d'industrialisation et de développement de gammes de produits etc.

Nous limiterons notre analyse aux outils méthodologiques susceptibles de répondre aux trois questions posées dans le chapitre 2 ci-dessus (page 65) qui porte sur :

- la rédaction du Cahier des charges fonctionnel
- l'incohérence dans la répartition du coût et des performances dans la structure de MES
- et la prise en compte du contexte de développement dans la conception des MES.

Selon les résultats de l'enquête et les analyses du développement des MES à l'ENSAM (Chapitre 2), l'utilisation des méthodes conventionnelles pour le développement des MES est très rare et inefficace. Pour connaître les raisons pour lesquelles ces méthodes et outils de

conception ne sont pas pertinents dans le développement des MES, une analyse est effectuée sur certaines méthodes et outils conventionnels comme Analyse Fonctionnelle et Analyse de la Valeur. Elle va démontrer leur inadaptation aux contextes de développement et aux caractères spécifiques des MES. Cette analyse permettra une formalisation de la problématique scientifique de notre recherche qui est la nécessité d'une méthode de conception nouvelle dédiée au développement des MES.

1 Démarches de l'expérimentation

Dans le chapitre 1 nous avons abordé les trois pôles d'activité dont l'expérimentation est l'outil indispensable : la recherche fondamentale, la recherche appliquée et le développement des produits. Ci-dessous nous présenterons les démarches de l'expérimentation utilisées dans ces activités.

Les démarches expérimentales pour la recherche sont pratiquées dans la recherche fondamentale et dans la recherche appliquée. Par contre, la démarche des plans d'expériences est utilisée principalement dans l'industrie et une partie de la recherche appliquée.

Ainsi, nous les synthétiserons par une démarche commune qui permet de les comparer et de relever leurs apports pour notre recherche

1.1 Démarches expérimentales pour la recherche

Dans la définition de l'expérience scientifique, VIGIER considère qu'une expérimentation doit être « planifiée, argumentée ... » [VIGIER 91]. Une expérimentation ne peut donc s'obtenir que par une procédure rigoureuse.

Les démarches de l'expérimentation sont développées grâce aux travaux de plusieurs générations de chercheurs et dans des domaines différents. Les épistémologues, depuis l'aube de l'approche objective de la connaissance au 17^{ème} siècle, ont tenté d'abstraire ce qui faisait le fond de la méthode scientifique [CARFANTAN 02]. Le 19^{ème} siècle nous a livré des expositions précises de la méthode expérimentale. Ainsi « L'introduction à l'étude de la médecine expérimentale », de Claude Bernard [BERNARD 66] qui est une proclamation très nette des exigences de l'expérimentation dans le domaine de la médecine.

Plus récente, la démarche expérimentale de BADIRU [BADIRU 96] est une méthode générale pour la réalisation des expérimentations. Elle permet d'identifier le modèle d'expérimentation nécessaire, de planifier les actions, de proposer les outils de dépouillement des résultats d'essais, etc. Dans son guide de la recherche, BADIRU a proposé cette démarche qui est constituée de 10 étapes :

1. 1. Vérification du besoin en expérimentation. Elle consiste à s'interroger sur la nécessité et la nature de l'expérimentation à réaliser. Est-elle rétrospective ou prospective ?
2. 2. Définition des objectifs de l'expérimentation. Elle consiste à développer les objectifs concrets que l'expérimentation doit accomplir et à les classer en ordre de priorité. Précisément, il faut déterminer le problème à résoudre, spécifier les critères expérimentaux (les variables dépendantes ou les paramètres de réponse...) et leurs natures.
3. 3. Identification des variables intéressantes. Le choix des variables intéressantes ne s'appuie pas que sur les objectifs de l'étude mais aussi sur d'autres critères supplémentaires, par exemple : prise en compte de la capacité des moyens techniques disponibles, etc. ? Il faut

classer les variables retenues en catégories : les variables de contrôle, dépendantes, indépendantes, etc. ?

4. 4. Identification des catégories de données et leur classement. Il y a différents types de données dont certains ne sont pas quantifiables directement. Le but de cette étape est donc l'identification des données réellement importantes et la façon de les mesurer. Ensuite de définir le périmètre des données et l'échelle de mesure adaptée à chacune une.

5. 5. Construction du plan d'expérimentation. Afin de construire ce plan, cette étape consiste à déterminer le nombre d'essais minimum, le protocole expérimental et les erreurs admissibles dans les résultats d'essais. Les méthodes des plans d'expériences sont adaptées pour optimiser le nombre d'essais.

6. 6. Réalisation des essais. Dans cette étape, l'évaluation des erreurs d'essais s'appuie sur les erreurs de reproductibilité et de répétitivité. La répétition des essais permet de valider les résultats, en excluant les résultats trop écartés de la moyenne.

7. 7. Analyse des résultats. Il existe plusieurs techniques d'analyse des résultats selon le type de données et selon le souhait de l'expérimentateur

8. 8. Rédaction du rapport d'expérimentation. Indépendamment des résultats mesurés, les remarques et les observations spécifiques à chaque résultat peuvent aider à la rédaction du rapport.

9. 9. Préconisation de l'utilisation des résultats. Les résultats d'expérimentation sont neutres par rapport à l'application qu'on souhaite en faire par la suite. Les conclusions s'appuient donc sur les interprétations des résultats d'essais. Il faut décrire les caractéristiques et les détails de l'expérimentation comme s'ils pouvaient être utilisés pour prendre des décisions dans le cadre de l'application proposée.

10. 10. Appropriation de l'expérimentation. L'expérimentation ne s'arrête pas là, elle doit être élevée à un niveau d'appropriation telle qu'elle permette aux chercheurs de comprendre d'autres sujets de recherche non expérimentaux.

C'est une démarche très générale dans le sens où elle laisse, aux utilisateurs, une certaine flexibilité d'adaptation à leur sujet, mais aussi la liberté d'adopter les méthodes et les outils expérimentaux de leur choix.

Dans cette démarche, les 4 premières étapes sont dédiées à l'analyse du besoin expérimental, l'identification des paramètres d'entrée et de sortie de l'expérimentation. Bien que les informations données par cette analyse ne soient pas en l'état compréhensif pour les concepteurs (avis des sondés de l'enquête LUONG 2001), mais si nous pouvons les traduire aux concepteurs elles seraient la source d'information importante pour comprendre le besoin fondamental du développement des MES.

Une difficulté pour utiliser cette démarche à notre service est que le moyen d'essai doit exister avant l'étape 3 afin de « prendre en compte la capacité des moyens techniques disponibles ». Cela explique pour quoi les chercheurs ne font pas cette analyse avant le lancement du développement de MES (dans le processus de développement des MES à l'ENSAM - chapitre 2 ; §3.1).

1.2 La démarche des plans d'expériences

Depuis la création des « méthodes des plans d'expériences » qui permettent d'optimiser le travail des expérimentateurs, les études de formalisation du processus de l'expérimentation sont devenues indispensables [GOUPY 89], [ALEXIS 95]. Elles permettent une application plus aisée et plus efficace de ces méthodes.

La démarche des plans d'expériences est le programme complet d'une expérimentation. Elle comprend la mise en place du dispositif, le déroulement des opérations et la collecte des données adéquates au traitement prévu.

J. DEMONSANT a souligné que « l'adoption de la démarche des plans d'expériences conduit à rompre avec certaines habitudes dans la façon de poser le problème, dans la façon de construire les campagnes d'essais et dans la façon de conduire les essais » [DEMONSANT 96].

La démarche des Plans d'expériences de TAGUCHI est l'une des plus utilisées dans la recherche et l'innovation pour un bon nombre de domaines d'activité. Elle devient la référence de la recherche expérimentale. Elle fait objet de la norme AFNOR X 06-080 et ISO 3534/3-1985 et 1998. Mais l'utilisation de la méthode TAGUCHI se limite dans le cas où le problème posé pourrait se présenter sous forme de « boîte noire » [LEGENDRE 97]. Ce qui exclue les essais de découverte dont les réponses en sortie ne sont pas identifiées auparavant, et les tests de validation de produit dans lesquels les relations entre les paramètres d'entrée et ceux de sortie sont connues.

Selon PILLET, afin d'utiliser toute la puissance de la méthode des plans d'expériences de TAGUCHI, il est important de suivre une démarche d'expérimentation rigoureuse. Il propose donc une démarche de mise en œuvre de l'expérimentation en 7 étapes (tableau 1).

N°	Etapes	Acteurs
1	Définition des objectifs et des moyens	Décideur & Spécialiste PE
2	Synthèse du « savoir-faire »	Spécialiste PE & « Hommes de l'art »
3	Construction du plan	Spécialiste PE
4	Conduite des essais	Spécialiste PE & Services opérationnels
5	Dépouillement & interprétation	Spécialiste PE & « Hommes de l'art »
6	Validation des résultats obtenus	Spécialiste PE & services opérationnels
7	Mise en œuvre et suivi	Décideur & services opérationnels

Tableau 1. Les sept étapes de la mise en œuvre des plans d'expériences [PILLET 94].

Dans leur ouvrage « Plans d'expériences – Construction et analyse » [BENOIST 94] BENOIST et ses associés propose la démarche des plans d'expériences en 5 étapes. C'est une démarche simplifiée de la pratique des plans d'expériences.

Le processus d'expérimentation de Legendre

C'est un processus d'expérimentation qu'on utilise dans certaines grandes entreprises (Fig. 14).

Fig.14.

Initialiser

Analyser

Réaliser les essais

Construire le plan d'expériences

Calculer Interpréter

Conclure

La démarche expérimentale [LEGENDRE 97]

Cette démarche est issue d'une adaptation de la démarche des Plans d'Expériences ci-dessus au contexte industriel. Elle est plus interactive et itérative, très adaptée au contexte industriel.

Mais là encore, nous constatons que le moyen d'expérimentation doit être identifié dès la première étape de la démarche d'expérimentation. Donc fort logiquement, les chercheurs ne peuvent commencer leur analyse quand le MES est déjà là.

Notre question est donc « est-il possible de faire une première ébauche de l'analyse expérimentale avant de développer le MES ? ». Pour répondre à cette question, nous étudions plus en détail les différents éléments de ces démarches.

1.3 Synthèse des démarches de l'expérimentation

Nous constatons que les démarches expérimentales sont nombreuses. Mais que ce soit pour la recherche ou le développement, pour appliquer la méthode de TAGUCHI ou non, toutes ces

démarches ont des points communs. Nous proposons donc une démarche synthétisée qui récapitule tous les éléments de celles que nous venons de citer.

Une analyse comparative (tableau 2) nous a permis de diviser cette démarche en 6 phases. Elle permet une corrélation entre les différentes étapes appartenant aux démarches existantes et celles de notre proposition.

Ce tableau ne présente pas toutes les démarches existantes. Il y a d'autres démarches d'expérimentations qui sont plus ou moins spécifiques à tel ou tel domaine d'application. Ici, notre attention n'est portée que sur les démarches pluridisciplinaires dont les démarches de PILLET, de LEGENDRE et de BADIRU sont des exemples.

Démarche synthétisée	PILLET	LEGENDRE	BADIRU	Tableau 2.
1. Formalisation du problème	Définition des objectifs et des moyens.	Initialiser.	Examiner le besoin en expérimentation. Définition des objectifs de l'expérimentation.	Comparaison des démarches d'expérimentation.
2. Modèle expérimental	Synthèse du « savoir-faire ».	Analyser.	Identification des variables intéressantes. Identification des catégories de données et leur classement.	Phase 1. Formalisation du problème. Cette
3. Construction des plans d'expériences.	Construction du plan.	Construire le plan d'expériences.	Construction de l'expérimentation.	étape est décisive, elle conditionne la
4. Réalisation des essais.	Conduite des essais.	Réaliser les essais.	Réalisation des essais.	stratégie qui sera appliquée pour la suite.
5. Dépouillement et interprétation.	Dépouillement & interprétation.	Calculer Interpréter.	Analyser les résultats	Selon GOUPY, on peut
6. Exploitation des résultats.	Validation des résultats obtenus. Mise en œuvre et suivi	Conclusion.	Rédaction du rapport de l'expérimentation. Recommandation pour l'utilisation des résultats. Appropriation de l'expérimentation.	

utiliser la méthode QQQQCP qui consiste à se poser les questions : **Q**ui est concerné ? De **Q**uoi s'agit-il ? **O**u (en quel lieu) ? **Q**uand (quel est le planning) ? **C**omment (quels sont les moyens nécessaires) ? **P**ourquoi réaliser ?

Dans cette phase, on doit identifier les points suivants :

- **Le problème** : Quelle est le problème à étudier ? Quelle est la nature de l'expérimentation à faire ?

- Les objectifs : Préciser les buts visés, les quantifier si possible, les classer dans l'ordre de priorité.
- Les moyens : les moyens humains (créer un groupe de travail) et matériels (définir les moyens d'essais), le budget et le délai
- Les limites et les contraintes : Définir le domaine de validité, l'environnement et identifier les contraintes liées au contexte de l'étude (les techniques et les moyens disponibles, le délai et le budget dédiés etc.)

Phase 2. Construction du modèle expérimental. Dans cette phase, on définit le système à étudier. Dans beaucoup de cas, on le modélise sous forme d'une boîte noire avec ses paramètres d'entrée et de sortie. Une étude sur les connaissances existantes dans le domaine relatif au sujet expérimental permet de :

- Identifier le système à étudier.
- Décrire les phénomènes qui peuvent se produire.
- Identifier les paramètres de sortie.
- Recenser et sélectionner les paramètres d'entrée. Les classer en paramètres à mesurer, à contrôler, à maîtriser ou à ne pas maîtriser.
- Définir le type de données pour chaque paramètre.

Phase 3 : Construction des plans d'expériences : Il s'agit de : construire un modèle – une stratégie, choisir la méthode d'expérimentation appropriée, construire le plan, définir le protocole d'essais.

Phase 4 : Réalisation des essais : Il s'agit de : réaliser les essais selon le protocole, noter tous les événements en cours d'essai dans un cahier de bord, enregistrer les résultats.

Phase 5 : Analyse et interprétation. La manière d'analyser les résultats dépend de la méthode d'expérimentation choisie. Par contre, l'interprétation des résultats est plus délicate. On doit vérifier si toutes les hypothèses de simplification, les limites et les contraintes prescrites sont validées. On doit également prendre en compte les événements imprévus en cours d'essai puis rédiger le rapport d'expérience.

Phase 6 : Exploitation. En se basant sur les résultats d'analyse et d'interprétation, il s'agit de trouver la réponse adéquate au problème posé (une optimisation, une amélioration, une validation, etc.). Dans le cadre de la recherche, faire une généralisation des conclusions pour les transformer en connaissances nouvelles. Appliquer ces connaissances selon le but de la recherche.

1.4 Remarque

La démarche expérimentale est un outil méthodologique pour les chercheurs. Dans cette démarche, les deux premières phases consistent à formaliser le besoin fondamental du chercheur sous forme d'un modèle théorique, puis à construire un modèle expérimental. Les chercheurs attendent des MES une réalisation des expérimentations qui soient fidèles à ce dernier.

Dans la première phase, celle de préparation de l'expérimentation, un des points abordés est la définition des moyens d'essais. Elle sera, dans beaucoup de cas, à l'origine d'un projet de développement des MES nouveaux. Mais à ce stade de l'étude, les analyses sur le phénomène

à étudier ne sont pas encore abordées. Les seules données d'entrée pour le développement des MES sont les problèmes à résoudre et les objectifs expérimentaux à atteindre. Or dans la deuxième phase, « Construction du modèle expérimental », les chercheurs peuvent fournir beaucoup d'informations concernant le phénomène expérimental, le système physique à étudier et son environnement. Elle sera très profitable pour les concepteurs si cette phase se faisait avant la conception du MES.

Si nous voulons faire la deuxième phase de la démarche expérimentale avant le développement de MES, nous serons obligés de reporter les connaissances techniques sur le MES plus en amont (avant la conception de celui-ci). Cette éventualité ne peut être envisagée que si dans l'équipe de projet, il y a des compétences en conception des MES et si la communication entre les chercheurs et les concepteurs passe bien. L'analyse expérimentale, dans ce cas, devra être modifiée pour s'adapter à cette nouvelle situation.

L'analyse des démarches expérimentales nous a permis de trouver une voie de résolution pour répondre à notre première question que nous nous sommes posée dans le chapitre 2 (page 65) relative à la rédaction d'un cahier des charges pour les MES. Avant de valider le choix des solutions pour ce problème et afin de répondre à d'autres questions, nous devons étudier les références méthodologiques de la conception des produits. Cette étude est présentée dans le paragraphe suivant.

2 Processus de conception de produits

Selon RODENACKER, le processus de conception des produits est une transformation d'informations permettant de passer *de l'abstrait au concret*. VADCARD considère la conception d'un produit comme une transformation *depuis une idée jusqu'à un produit* [VADCARD 96]. Dans notre cas, la conception de MES ne commence pas depuis une idée abstraite mais depuis un problème expérimental bien précis. Dans ce paragraphe, nous avons abordé ce sujet.

Les méthodes générales en conception sont développées pour modéliser le processus de conception. Nous consacrons ce paragraphe à étudier ces méthodes.

La modélisation du processus de conception des produits a fait l'objet de plusieurs recherches avec des approches différentes. Les études récentes [DENEUX 02], [POVEDA 02], [LONCHAMPT 04] synthétisent trois approches méthodologiques principales: approche algorithmique, approche axiomatique et approche intégrée.

2.1 Approche algorithmique dans la modélisation du processus de conception

Cette approche est le principe d'une tendance de modélisation qui considère que la nature du processus de conception est plutôt séquentielle, [PAHL 94], [GAUSS 95], [FINKELSTEIN 95]. Selon l'approche algorithmique, le processus de conception se caractérise par un ensemble de tâches de conception distinctes. Chaque tâche est associée à un ensemble d'étapes permettant de fournir les résultats indispensables à l'enclenchement de la tâche avale.

Dans l'optique de rationaliser l'activité de la conception, l'approche algorithmique est très employée. A titre d'exemples, les méthodes de conception générales de PAHL & BEITZ [PAHL&BEITZ 96], de ERTAS & JONES [ERTAS&JONES 94], de BOCQUET [BOCQUET 94], de ULLMAN [ULLMAN 92], de AOISSAT [AOISSAT 90], de HUBKA

[HUBKA 88] et de QUARANTE [QUARANTE 84]. Les travaux effectués dans le cadre de la commission du projet pédagogique de PRIMECA [BOCQUET 94] sont aussi favorables à cette approche. Ces méthodes forment une courant dit « les modèles séquentiels » du processus de conception [LONCHAMPT 04]. Elles sont contractuelles, pédagogiques et donc très adaptées aux petits projets [WESTNEY 91], [CHVIDCHENKO 94]. La plupart des projets de développement des MES en fait partie.

Dans sa thèse, Philippe VADCARD [VADCARD 96] a synthétisé ces méthodes en proposant la méthode de conception de produits en 4 phases [VADCARD 96, p. 62-63] qui va de « la caractérisation pluridisciplinaire du besoin » pour aboutir au lancement de l'industrialisation en passant par « la recherche de concepts de solutions », « la définition préliminaire du produit » et « la définition détaillée du produit » (Fig. 12).

Fig.15.



Industrialisation

Qualification

Dossier

produit

Contrôles

Décisions

Travail

interdisciplinaire

Travail

interdisciplinaire

Travail

interdisciplinaire

Principes

de solution

Conception

préliminaire

Contrôles

Contrôles

Contrôles

Décisions

Décisions

Décisions

Méthode de conception de produit [VADCARD 96]

Formalisation data-gramme A0 des phases (SADT)

Selon les constatations de POVEDA et LONCHAMPT, les méthodes systématiques « *abordent donc la conception comme un processus irréversible* » [POVEDA 02, page 19]. Elles ont « *besoin d'ajouter un ensemble de réitérations possibles et souvent nécessaires* » [LONCHAMPT 04, page 25]. Les méthodes développées dans les années quatre-vingt dix ont bien insisté sur cet aspect en insérant des étapes de validation et des boucles intra phase ou entre phases [AOUSSAT 98], [PAHL 96], [FINKELSTEIN 94].

2.2 Approche axiomatique dans la modélisation du processus de conception

Cette approche repose d'une part sur l'utilisation d'axiomes généraux susceptibles de mener à une « bonne conception », d'autre part sur l'adoption d'un cheminement itératif entre les différents domaines du développement de produits, sans toutefois imposer d'étapes rigoureuses.

Cette approche a été initiée par SUH puis NAKAZAWA YOSHIKAWA et SOHLENIUS, [NAKAZAWA 84], [YOSHIKAWA 89], [SUH 90], [SOHLENIUS 92]. Elle permet une modélisation mathématique et une optimisation de l'activité de conception selon deux axiomes principaux : l'indépendance fonctionnelle et le minimum d'informations [SUH 90].

Selon l'approche axiomatique, le concepteur fait constamment un parallèle mental entre différents domaines : domaine client, domaine fonctionnel, domaine physique et domaine processus (Fig. 14).

Fig.16. Conception de produits selon l'approche axiomatique de SUH.

Source de [SUH 90].

- • **Le domaine client** consiste à identifier le besoin de client, ses attentes, dans une spécification sous forme d'un cahier des charges. Au tout début de la conception, ce cahier de charges n'est pas encore définitif. *Il peut évoluer vers un cahier des charges réalisable en fonction d'informations accumulées au cours de la conception* [JENSSEN 90].
- • **Le domaine fonctionnel** contient un ensemble de fonctionnalités répondant aux exigences contenues dans le cahier des charges. Elles décrivent de façon abstraite les différentes tâches que l'objet physique devra assurer. Cet ensemble de fonctionnalités est souvent structuré sous la forme d'un arbre de décomposition fonctionnelle.
- • **Le domaine des objets physiques** contient les informations décrivant physiquement l'objet conçu : son architecture, ses composants et ses paramètres physiques etc. Ces informations sont dérivées du domaine fonctionnel en considérant les contraintes physiques et technologiques de réalisation de l'objet.
- • **Le domaine des processus** contient les processus d'industrialisation, de fabrication, etc. qui permettent de mettre en œuvre l'objet conçu décrit dans le domaine physique.

Dans le cadre de notre recherche, nous nous limitons aux trois premiers domaines qui constituent la conception (et non pas l'industrialisation). Schématiquement, la transformation du problème de conception d'un domaine à l'autre est effectuée par une fonction de projection souvent d'une dimension n à une dimension m différente. Une fonctionnalité peut par exemple être assurée par plusieurs composants. Inversement, un composant peut assurer plusieurs fonctionnalités. Nous pouvons trouver dans [MITTAL 90] [KUSIAK 92] [O'SULLIVAN 98] quelques méthodes de projection liant les trois domaines : client, fonctionnel, physique.

La fonction de projection du domaine fonctionnel {FR} au domaine physique {DP} se présente sous forme d'une matrice que SUH la nomme « matrice de conception » [A].

$$\{FR\}=[A]\{DP\}$$

Les axiomes de conception de SUH s'appliquent surtout à la construction de cette matrice. Ils peuvent être interprétés par une optimisation de la matrice [A]. L'indépendance fonctionnelle est atteinte quand la matrice [A] est linéaire. La matrice triangulaire (découplée) correspond à une conception « résolue » qui s'écarte des contradictions. Le minimum d'information correspond à la taille minimisée de la matrice tout en respectant le premier axiome.

Selon SUH [SUH 90], les produits développés en respectant les axiomes de conception sont les bons produits. L'indépendance fonctionnelle permet un potentiel d'amélioration et d'adaptation du produit au cours de son développement. L'information minimale permet d'éviter « *la redondance des informations véhiculées* ». Elle augmente l'efficacité de la conception et la maîtrise de la qualité du produit [POVEDA 02]. Mais « *son application pratique en mécanique est souvent de peu d'intérêt car le découplage fonctionnel entraîne une multitude d'organes, de formes, qui s'opposent à de bonnes performances statiques et dynamiques* » [PRUVOT 93, Vol.1, p.21].

En revanche, cette approche est utilisée de plus en plus dans des projets de développement de systèmes d'information [KIM 91], [KIM 04], [DO 00], de systèmes complexes [HINTERSTEINER 99] de « soft design » [DONNARUMMA 02] de « manufacture multi site » [NGAI 03], développement durable [AHLSTROM 01], etc.

2.3 Approche intégrée dans la modélisation du processus de conception

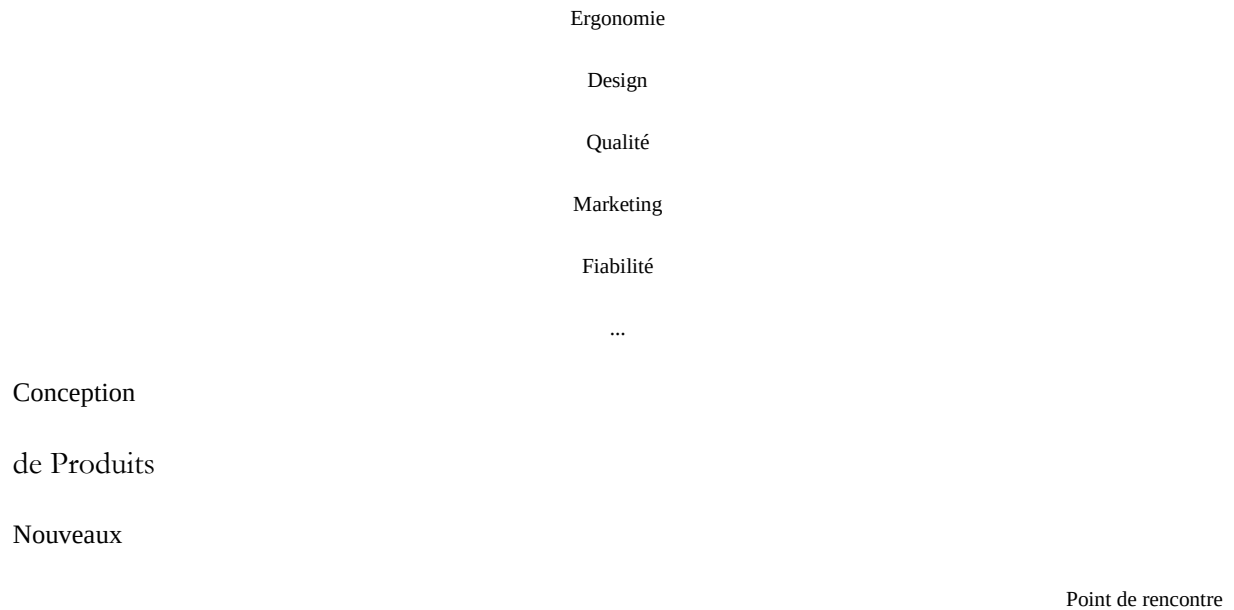
L'approche algorithmique et l'approche axiomatique sont néanmoins les approches structurantes qui selon POVEDA ont certains inconvénients. Elles considèrent la conception comme une résolution de problèmes irréversibles et ses méthodes ont une faible dimension contextuelle [POVEDA 02 §1.5.3]. L'approche intégrée permet de compenser ce manque.

Sans être complètement simultanée, l'approche intégrée considère que les acteurs qui interviennent dans le cycle de vie du produit doivent intervenir plus en amont, dans le processus de conception. Cette troisième approche est développée depuis quelques décennies. Selon Le Coq, « *tous les acteurs qui interviennent dans le cycle de vie du produit subissent les choix de conception. Donc la phase de conception du produit doit être par essence intégrative* » [LE COQ 92 p. p.39]. La mise en pratique de cette approche impose des changements majeurs dans la structure de l'entreprise et dans sa culture. Elle nécessite un modèle de conception adéquat, qui permet l'intégration des disciplines dans le processus de conception.

Les travaux menés au sein du laboratoire Conception de Produit Innovant (CPI) de l'ENSAM s'inscrivent dans cette optique. Ils concernent les études de LE COQ en 1992 poursuivies par celles de AOISSAT, de BASSEREAU et de GAUTIER en 1995.

AOISSAT considère le processus de conception comme « un processus horizontal qui puise ses sources dans des disciplines verticales » [AOISSAT 95] (Fig. 17).

Fig.17.



La conception de produits [AOUSSAT 95].

Concevoir un produit nouveau nécessite un appel aux disciplines qui font les sciences de l'ingénieur, les sciences de la vie, les sciences de la société et les sciences cognitives [AOUSSAT 98]. Compte tenu des multiples métiers connectés à la conception de produits, les méthodes d'intégration sont innombrables. Elles représentent le courant qui se nomme « Ingénierie intégrée ».

Les intégrations de l'assemblage [SWIFT 82], [BOOTHROYD 83], [ANDREASEN 83], [LE COQ 92], [CHAL 94] de la fabrication [BOOTHROYD 94], [BRISSAUD 97] et de la qualité [***] dans la conception de produits sont les premiers concernés. En suite on trouve les intégrations de la maintenance [PECHT 95], [GABRIEL 99], de l'environnement [AKAO 93], [FUSSLER 96], [MILLET 03]. Elles intègrent, dans le processus de conception, les contraintes liés au cycle de vie du produit : de sa fabrication jusqu'à sa destruction.

Une autre tendance d'intégration regroupe les métiers connexes à la conception. On trouve principalement les métiers comme : design [HUISMAN 71], [BORJA 90], [COLIN 88], ergonomie [BRIME 97], [ROUSSEL 96], et de bien d'autres métiers.

2.4 Remarques

En réalité, ces 3 approches sont complémentaires. Elle fait naître le « Concurrent Engineering » qui, selon Patrick JAGOU, « est une approche organisationnelle systématique tendant vers la conception simultanée et intégrée » [JAGOU 93].

Dans l'ouvrage « Encyclopedia of Production and Manufacturing Management » le Concurrent Engineering est présenté comme une démarche inspirée par ces trois approches et qui regroupe 4 activités [LOCH 99] : Définir les tâches de développement, Planifier des activités associées à ces tâches, définir des mécanismes de coordination et d'intégration dans la phase amont du développement et établir le processus support et une organisation appropriée (Fig. 18).

Fig.18. Operations Managements Issues in Concurrent Engineering [LOCH 99]

Le Concurrent Engineering est une des tendances les plus importantes dans le développement de produits nouveaux au cours des deux dernières décennies. Il est né principalement sous la pression du facteur « temps » qui domine tous les marchés caractérisés par des forts volumes et des faibles marges[JAGOU 93].

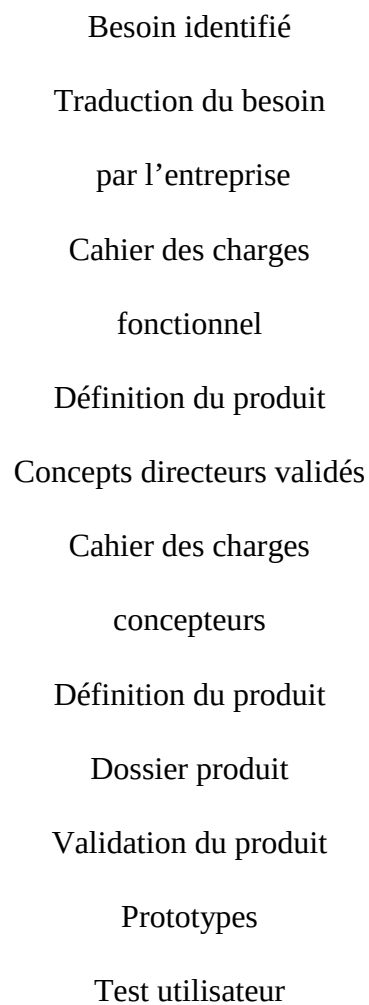
Dans le cadre des petits projets comme ceux du développement des MES, l'application intégrale de cette démarche ne paraît pas indispensable à cause des différentes raisons suivantes [AFITEP 98b], [WESTNEY 91] : le développement en petite série, le budget limité, le nombre de participants, l'organisation des projets de façon occasionnelle, etc.

Après une analyse du besoin qui s'appuie sur les informations de l'enquête que nous avons présenté dans la chapitre 2, l'approche algorithmique paraît la mieux adaptée pour modéliser le processus de conception des MES. Elle est adaptée pour guider le concepteur dans son travail car elle détermine plus précisément les opérations nécessaires pour passer du domaine fonctionnel au domaine physique. Nous choisissons donc cette approche pour l'appliquer à la conception des MES.

Dans cette direction, la méthode de conception développée au sein du laboratoire CPI de l'ENSAM [AOUSSAT 98], est une modélisation générale du processus de conception dédiée aux produits nouveaux dont les MES font partie. Cette méthode est constituée de 4 grandes phases (Fig. 19) :

Fig.19.

Industrialisation



Phase 1:

Traduction du besoin

Phase 2:

Interprétation du besoin

Par l'entreprise

(recherche de concepts)

Phase 3:

Définition du besoin

Phase 4:

Validation du besoin

La démarche de conception « CPN »

Selon [AOUSSAT 98]

Cette méthode est une modélisation du processus de la conception de produits déjà expérimentée dans des centaines de projets et approuvée sa pertinence pour les PME-PMI dans le développement des produits nouveaux [AOUSSAT 98]. Notre intention n'est donc pas de la remettre en question mais plutôt d'analyser les différentes manières d'appliquer ce modèle.

3 Cadre de référence de notre recherche méthodologique

Selon les objectifs visés, les outils méthodologiques sont développés pour identifier les actions nécessaires au déroulement du processus de conception. Dans ce paragraphe, nous

identifions donc le cadre de référence des méthodes et outils nécessaires à notre recherche méthodologique.

Notre stratégie est de chercher dans les méthodes existantes celles qui permettent de répondre le mieux à notre problématique. La problématique du terrain expérimental nous a permis de décliner les éléments opérationnels à satisfaire. Pour identifier notre cadre théorique de référence, nous mettons l'accent sur les éléments principaux suivants :

- • Elaboration du cahier des charges précis, complets, compréhensibles,
- • Répartition de façon cohérente du coût et des performances dans la structure du produit développé.
- • Prise en compte du contexte de développement dans les laboratoires de recherche.

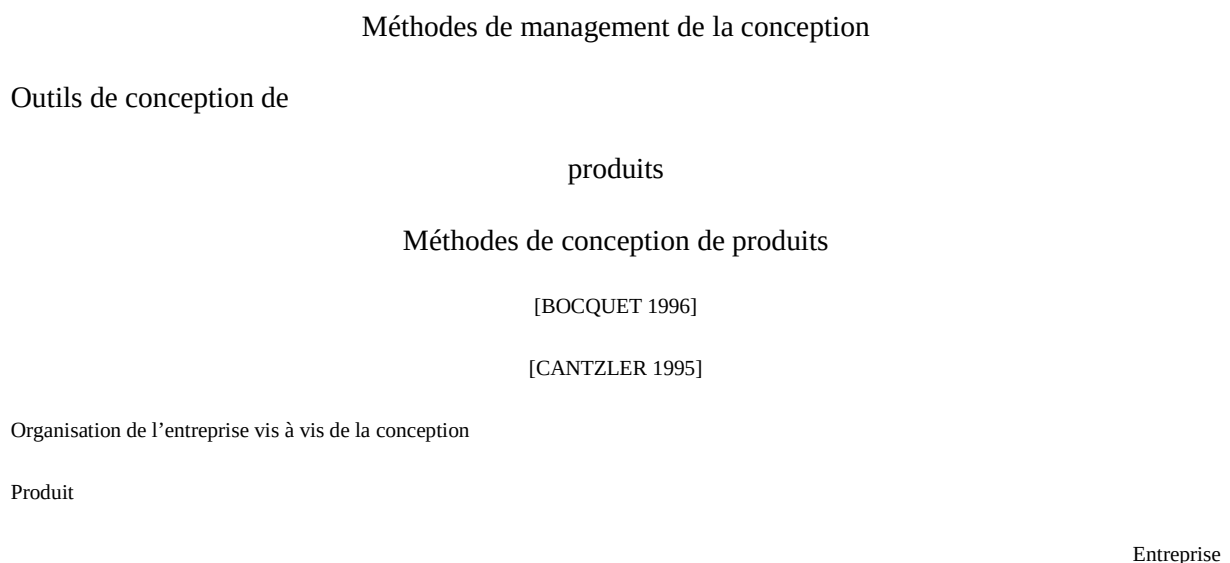
Les MES sont des produits du type « système » qui sont proches des produits tels que machine spéciale, système de production, équipement de contrôle, etc. . On privilégie donc les méthodes et outils qui sont destinés à ces produits.

Pour un bon nombre de laboratoires de recherche, la quantité très importante d'outils et de méthodes de conception existantes est un obstacle pour choisir celles qui sont adaptées au développement des MES [selon l'enquête LUONG 01a]. Pour notre recherche, nous rencontrons la même difficulté. Afin de faire converger notre champ de recherche, notre stratégie est de nous appuyer sur les typologies proposées par les recherches précédentes, puis de recenser les catégories qui nous conviennent le mieux.

3.1 Niveaux d'intervention des outils méthodologiques en conception

Tous les outils méthodologiques n'interviennent pas au même niveau dans le processus de conception. Grâce aux travaux de BOCQUET [1996] et CANTZLER [1995], les trois niveaux d'intervention sont identifiés : il s'agit du « niveau produit », du « niveau projet » et du « niveau de l'entreprise ». VADCARD s'appuie sur ces travaux pour distinguer les outils de conception de produit, les méthodes de conception de produit et les méthodes de management de la conception (Fig. 15).

Fig.20.



Objet d'intérêt des éléments méthodologiques en conception de produit**Eléments méthodologiques en conception de produit**

Taxinomie des éléments méthodologiques en conception de produit
Définitions des outils et méthodes en conception
[VADCARD 96]

En corrélation avec notre problématique du terrain expérimental (Chapitre 2, §4.) :

Niveau du produit : La qualité insuffisante des MES développés justifie la nécessité de faire évoluer les pratiques de conception. Les deux points essentiels sont : l'analyse imparfaite du besoin et l'incohérence dans la structure du MES à concevoir (chapitre 2).

Niveau de projet : C'est à ce niveau que la conception de MES a besoin d'être rationaliser et optimiser. La communication entre les chercheurs et les concepteurs a besoin d'être structurée. Selon notre enquête [LUONG 01a], dans le contexte des laboratoires académiques, les contraintes de budget et de délai ne sont pas les mêmes que dans l'industrie.

Niveau d'organisation du laboratoire : Le contexte des laboratoires de recherche ne permet pas un changement significatif de l'organisation. Les projets de développement des MES ne sont pas l'objectif principal du laboratoire. Un outil de management de la conception ne trouvera pas sa place dans ce contexte. Selon l'enquête [LUONG 01a], une des raisons pour laquelle les laboratoires sondés ne sont pas favorables à l'application d'une méthode est la contrainte organisationnelle et de ressource humaine.

Donc, nous supposons que notre recherche doit s'orienter vers les méthodes et les outils méthodologiques qui :

- au niveau du produit, permettront une meilleure analyse du besoin et une meilleure répartition en coût et en performances dans sa structure,

- • au niveau du projet, permettront une planification des activités nécessaires et une coordination des acteurs du développement du produit en tenant compte du contexte.

Nous focalisons donc notre recherche sur les méthodes et outils d'aides à la conception. Une analyse de typologie nous permet de mieux connaître ces différents outils méthodologiques.

3.2 Typologie des méthodes de conception

Que ce soit le coût, la qualité, le délai ou un objectif quelconque, les différentes méthodes de conception consistent à définir la manière de mener le projet de conception. Elles identifient et utilisent les outils d'aide à la conception pour suivre le processus dans un but commun. Selon leur objectif, on peut citer ici quelques groupes principaux :

- • Le groupe des méthodes de la valeur qui regroupe des méthodes de conception en vue d'optimiser la Valeur : Analyse de la Valeur (AV) Conception pour un Coût Objectif (CCO) ; Conception pour un Coût Global Objectif (CCGO) et etc. [AFAV **], [NF X 50-150 153].
- • Les méthodes de qualité dont l'objectif est la qualité du produit: Total Quality Control (TQC) [JUSE 93], Sûreté de fonctionnement [VILLEMEUR 97], [CHERFI 02] ;
- • Le groupe des méthodes de conception pour un objectif défini : Ingénierie intégrée : [***] ; « design for X » [HUANG 96] comme son nom l'indique, elle vise aux différents objectifs qui sont tous intégrés dans le « concurrent engineering ».
- • Le groupe des méthodes de la conception robuste dont l'objectif est la robustesse du produit à concevoir [TAGUCHI 00] [***]. Ils ne permettent pas d'optimiser le coût mais de développer un produit robuste insensible aux changements de l'environnement. Une des applications de ces méthodes porte sur la conception des produits unitaires [WHITFIELD 98].
- • Le groupe des méthodes de conception axiomatique [SUH 00] visent à la conception dite « optimale » qui respecte les axiomes proposés par SUH. Le but de ces méthodes est d'éviter les interactions entre les fonctions et donc de minimiser les contradictions dans la structure et de minimiser les effets perturbateurs que peut engendrer la non-qualité du produit
- • Le groupe des méthodes d'intégration des métiers permet d'atteindre des objectifs autres que les fonctions d'usage du produit : design [COLIN 88], ergonomique [ROUSSEL 96], environnement [AKAO 93], etc.
- • ...

La frontière entre les groupes n'est pas complètement distincte. La valeur représente un des critères de la qualité totale. Dans les méthodes de « design for X », on trouve le « design for quality ». Le respect des deux axiomes proposés par SUH dans la conception axiomatique permet une conception plus robuste du produit. La conception robuste permet d'améliorer la qualité du produit en minimisant l'impact des paramètres de « non-qualité » sur la qualité finale du produit, etc.

3.3 Typologie des outils d'aide à la conception

Les études de VADCARD permettent une certaine clarté dans ce domaine. Il a recensé plus d'une centaine d'outils et de méthodes diverses selon l'activité qu'ils assurent dans le processus de conception et les a classé en sept familles (fig. 16).

Fig.21.

Quatrième famille

Outils de matérialisation

de solution

Troisième famille

Outils de

définition

de solution

Deuxième famille

Outils de créativité

Première famille

Outils de caractérisation

pluridisciplinaire du besoin

Cinquième famille

Outils

d'analyse

de solution

Sixième famille

Outils de

management

de projet

Septième famille

Outils de qualité

Spécifications pour la conception

Plans préliminaires

Plans définitifs

Clarification du problème

Conception préliminaire

Concept de solutions

Dossier produit

Conception détaillée

Processus de conception selon Pahl & Beitz [PAHL 96]

Sept familles d'outils de conception.

Selon le classement de VADCARD [VADCARD 96]

Les quatre premières familles interviennent principalement dans quatre phases du processus de conception. En revanche, les trois dernières familles ont des impacts sur l'ensemble du processus.

La première famille attire particulièrement notre attention car elle concerne l'élaboration du cahier des charges fonctionnel. Mais à l'exception de **l'Analyse Fonctionnelle, la Première matrice de QFD et le FAST**, la plupart sont des outils métiers comme : outils de marketing, outils de benchmarking, outils de design, etc. qui ne correspondent pas à notre recherche.

Les deuxième, troisième et quatrième familles facilitent les travaux de recherche d'idées et des solutions mais ne permettent pas pour autant d'optimiser ces solutions.

La cinquième famille regroupe les outils d'analyse critique des solutions ou des principes de solutions. En tête de cette famille on trouve l'**AMDEC**, outil le plus utilisé et connu dans l'industrie. Selon une enquête menée par le CETIM, même les PME-PMI l'utilisent et le nombre d'utilisateurs évolue sensiblement [RIOUT 92].

La sixième famille rassemble les outils dont l'objectif est d'organiser et de gérer le travail interdisciplinaire de la conception. Ils permettent de gérer les tâches, le temps, les moyens et

les coûts. Ces outils sont adaptés et ont prouvé leur pertinence surtout face aux projets de grande envergure [GAUTIER 95]. Ces outils ne sont pas très adaptés compte tenu du contexte de développement des MES.

La septième famille est une grande famille où tous les outils de la qualité (dans le sens large du terme) sont présentés. Selon l'AFCIQ, « un outil qualité est un ensemble cohérent de dispositions pratiques mises en place dans l'entreprise en vue d'améliorer les performances d'une ou de plusieurs caractéristiques d'un produit ou service » [AFCIQ 90, ch.3, p.4]. Dans cette famille, on distingue les outils qualité qui interviennent spécifiquement dans certaines étapes du processus de conception et d'autres qui ont leurs effets sur l'ensemble du processus. **Cette famille retient particulièrement notre attention et fait l'objet de notre analyse dans le paragraphe §4 suivants.**

3.4 Outils méthodologiques pour la conception des systèmes

Comme les machines spéciales, les MES sont des produits du type « système » (selon la définition de NF E 90.001). Dans beaucoup d'études, on différencie la conception des systèmes de celle des produits.

Une approche seulement structurelle ne suffit pas pour représenter un système. La conception des systèmes nécessite une approche globale « l'approche des systèmes » [TEIXIDO 98]. Elle permet d'appréhender trois aspects : l'aspect fonctionnel, l'aspect structurel, l'aspect temporel.

L'aspect fonctionnel d'un système consiste à « faire ressortir l'aspect dynamique des systèmes, c'est-à-dire les interactions qu'ils créent, d'une part avec l'environnement (il s'agit des fonctions de service), et d'autre part entre les composants (ce sont les fonctions techniques ou fonctions élémentaires) » [TEIXIDO 98]

L'aspect structurel représente la structure de système sous forme des plans, des nomenclatures, des architectures qui relient les composants du système dans espace.

L'aspect temporel est indispensable pour analyser les différentes activités du système lors de son utilisation.

Dans l'ouvrage « Conception en mécanique industrielle » [BARLIER 95], TEIXIDO recense les outils méthodologiques sous forme d'une matrice (tableau 3) en fonction d'une part de ces trois aspects et d'autre part des étapes contenues dans une démarche générale de conception (§3.2) ou une démarche « analyse de la Valeur ».

	Démarche fonctionnelle	Démarche temporelle	Démarche structurelle
e et tion soin	Enquête Diagramme (PARETO, ISHIKAWA, ...) « Bête à cornes » examen de l'environnement analyse des séquences	GRAFCET (point de vue système) GEMMA Analyse des états Algorithme	

	Graphe d'interactions « Pieuvre » Contrôle de validité Outils de caractérisation et de hiérarchisation Analyse des états SADT (A-0 et A-1) ...	PERT GANTT ...	
analyse avant	FAST (de description) Analyse de la valeur (des fonctions de service) Bloc-diagramme fonctionnel A.M.D.E.C. Schéma fonctionnel Diagramme digital Schéma-bloc Table de vérité Arbre des voies technologiques Liste des états ...	GRAFCET (point de vue PO-PC) Chronogramme Ordinogramme Analyse de déroulement Planning ...	Organigramme technique du produit Schéma structurel Graphe de montage – démontage Logigramme Plan d'implantation Table de vérité Plan d'ensemble et de définition Nomenclature Schéma technologique ...
recherche d'optimisation de validation	FAST (de créativité) Arbre des voies technologiques Logiciels de CAO Séquence de flux bouclés Bloc-diagramme idéal Contrôle de validité Tableaux de décision	Logiciels GRAFCET Guides de décision ...	Documentation technique Calculs Logiciels de validation Guides de décision (composants) Bloc-diagramme fonctionnel ...

Tableau 3. Principaux outils d'analyse des systèmes dans une démarche de conception [TEIXIDO 98].

Dans la phase de saisie et de définition du besoin, c'est grâce à l'analyse des états, des séquences, des procédés, des protocoles, etc. que l'on aborde le besoin en terme de fonction à remplir et que l'on construit le chronogramme des fonctions dans un espace temporel.

Dans le développement des MES, l'analyse doit donc porter sur le protocole d'expérimentation et les différents états de transformation du phénomène à étudier. La difficulté réside dans le caractère spécifique des MES identifiés dans le chapitre 1 : la méconnaissance des états du système à étudier et l'incertitude des paramètres qui l'influencent. Elle limite l'efficacité des outils cités ci-dessus.

3.5 Synthèse des références méthodologiques en conception de produit

L'analyse taxinomique des outils méthodologiques nous permet d'identifier les niveaux d'intervention nécessaire à notre problématique. Elle oriente notre recherche sur les méthodes et outils méthodologiques de la conception de produits qui permettent :

- au niveau du produit, une meilleure analyse du besoin et une meilleure répartition en coût et en performance,
- au niveau du projet, une planification des activités nécessaires et une coordination des acteurs du développement du produit en prenant en compte le contexte de développement.

Cette orientation nous amène à étudier les typologies des méthodes et des outils d'aide à la conception. Ce qui nous permet d'identifier le cadre de référence de notre recherche méthodologique.

En comparant les méthodes et les outils ci-dessus avec notre problématique, notre intention est de converger vers les méthodes de conception et les outils associés qui optimisent « la valeur ». En particulier, nous étudions ici les outils d'analyses du besoin, d'analyse de la valeur et les outils de qualité dans la conception de produits.

Dans cette optique, l'approche des systèmes permet d'analyser les aspects fonctionnel, structurel et temporel d'un produit du type « système ». Elle sera importante à appliquer dans le développement de MES.

Le paragraphe suivant est consacré à l'analyse de l'apport de la méthode d'Analyse de la Valeur et ses outils, mais aussi à certaines incompatibilités avec la conception des MES.

4 Analyse de la Valeur – Analyse Fonctionnelle dans la conception des MES

L'Analyse de la Valeur, méthode de conception normalisée [NF X 50-150 ; NF X 50-152 ; NF X 50-153], est largement diffusée dans l'industrie. Elle est enseignée dans toutes les écoles

d'ingénieurs. Dans son ouvrage « Analyse de la valeur », DELAFOLLIE a présenté la méthode comme une démarche globale où interviennent les différents outils méthodologiques pour atteindre le but final qui est le produit « valeur ». Il définit « l'Analyse de la Valeur (AV) comme une méthode de conception de produit qui permet d'élaborer ou de rechercher un produit ou un service conforme à ce que le client en attend (qualité optimale) tout en réduisant au strict nécessaire les ressources employées (coût minimal) » [DELAFOLLIE 91].

L'Analyse Fonctionnelle, une étape importante de cette méthode, tend à élaborer un cahier des charges fonctionnel complet et précis. Dans la préface de l'ouvrage « Exprimer le besoin » [AFAV 89], Alain PERROY a écrit « exprimer le besoin ... par les voies de **la démarche fonctionnelle**, qui associe la rigueur de la qualité et la créativité de l'innovation, est le plus sûr moyen d'obtenir une réponse adaptée et d'améliorer la communication, et la compréhension entre partenaires ».

C'est donc pour ces raisons que nous nous sommes intéressés aux méthodes d'Analyse de la Valeur et d'Analyse Fonctionnelle. Dans une perspective de conception des MES, ce paragraphe a pour objectif de révéler les points essentiels de l'Analyse de la Valeur, de l'Analyse Fonctionnelle et des outils méthodologiques associés, leurs points forts ainsi que leurs inconvénients.

4.1 Principe de l'Analyse de la Valeur – Analyse Fonctionnelle

L'Analyse de la Valeur est développée en 1947 par la société « General Electric » grâce aux travaux de L.D. Miles. L'AV est arrivée en Europe dans les années 60 et utilisée dans l'industrie pour faire face à des défis économiques et stratégiques importants. En 1978, une association française pour l'analyse de la valeur (AFAV) qui rassemble les divers praticiens de la méthode est constituée. Les normes de NF X50.150 à NF X50.153 qui portent sur ce sujet, sont établies et éditée en 1985. Depuis 1999, une nouvelle norme européenne (NF EN 12973) propose un élargissement de la perspective des approches « valeur » en proposant le « management par la valeur » (MV).

L'AV présente un plan de travail en 7 phases. Dans chacune de ces phases, interviennent un ou plusieurs acteurs dans des conditions précises avec des outils méthodologiques associés (Tableau 2) :

Tab.2	Phases	Acteurs	Outils méthodologiques associés.
1	Orientation de l'action AV.	+Décideur - Animateur	APTE (la bête à cornes)
2	Recherche de l'information.	+Animateur - Groupe de travail - Services opérationnels	Veille technologique,
3	1 Analyse fonctionnelle	+ Animateur + Groupe de travail - Services	AFI : FAST AFE : APTE, Méthode intuitive : Analyse des

			opérationnels	séquences, analyse de l'environnement, analyse des règles et des normes
	2	Analyse des coûts	+ Services opérationnels - animateur - Groupe de travail	Méthode du catalogue Méthode du barème méthode analogique méthode paramétrique
	3	Validation des besoins et des objectifs	+ animateur + Groupe de travail - Services opérationnels	
4		Recherche d'idées et de voies de solution.	+ animateur + Groupe de travail - Services opérationnels	Les techniques rationnelles : TRIZ, matrices de découverte, check-list, méthode morphologique, APTE Les techniques non rationnelles : Brainstorming, démarche analogique
5		Etude et évaluation des solutions.	+ Services opérationnels - animateur - Groupe de travail	Méthode DELPHI BDF, Coût juste nécessaire
6	1	Bilan prévisionnel	+ animateur + Services opérationnels - Groupe de travail	Méthode O'Meara
	2	Présentation des solutions retenues	+ animateur + Groupe de travail	
	3	Décision	+ Décideur - animateur	
7	1	Réalisation des solutions choisies	+ Services opérationnels - animateur	
	2	Suivi	+ animateur + Services opérationnels	

	3	Bilan définitif	+ animateur	
			- Services opérationnels	

Tableau 4. L'action Analyse de la Valeur : les acteurs et les outils associés

selon [DELAFOILLIE 91], [CHALMET 98]

(+) Responsabilité

(-) Participation

Sans aller trop loin dans les détails, notre présentation sera centrée sur une corrélation entre les problèmes de la conception des MES et les aboutissements de l'Analyse de la Valeur. Les trois points principaux abordés sont les suivants :

- Expression du besoin d'expérimentation,
- Répartition en coût et en performance dans la structure,
- Prise en compte du contexte de développement.

4.2 Expression du besoin d'expérimentation

Un des problèmes de la conception des MES réside dans l'élaboration de cahier des charges incomplet, imprécis et difficilement compréhensible. L'Analyse Fonctionnelle semble être un moyen de palier ces manques car elle exige une démarche systématique qui tend vers une expression juste du besoin.

Dans l'ouvrage « Management de projet technique – Méthodes et outils » [CAZAUBON 97], la spécification technique du besoin (STB), document qui prolonge le cahier des charges fonctionnel, sollicite 4 types de références :

- Les exigences fonctionnelles du produit, issues de l'Analyse Fonctionnelle externe (AFE) ;
- Les exigences de sûreté de fonctionnement, définies en termes de fiabilité, de facilité de maintenance, de sécurité, de robustesse ;
- Les exigences relatives à la conception (solutions techniques imposées, composants normalisés à étudier, interface, ...) ;
- Les exigences relatives à la qualification et à l'acceptation du produit dans le cadre des procédures visant à établir la conformité du produit défini par rapport au besoin spécifié et la conformité du produit réalisé par rapport au produit défini.

Le Cahier des charges fonctionnel constitue une première étape importante dans l'analyse du besoin. Il se limite à l'exposé des exigences fonctionnelles du demandeur.

4.2.1 Analyse Fonctionnelle du besoin

Si l'Analyse Fonctionnelle est la solution pour mieux exprimer le besoin, c'est parce qu'elle présente en réalité un processus qui associe des outils méthodologiques pour identifier les exigences du cahier des charges fonctionnel.

L'Analyse Fonctionnelle Externe débute par la détermination des fonctions de service. Pour cela, on utilise à priori la méthode des milieux extérieurs et des outils méthodologiques associés qui ont été diffusés par la société APTE. « Cette méthode est ancrée sur une vision systémique du produit à concevoir, considérée comme une « boîte noire » au centre d'autres systèmes/objets (on parle de milieux extérieurs) avec lesquels il est en rapport direct à un moment donné de son existence » [YANNOU 02a]. Cette méthode présente 5 phases :

- 1 L'expression et la validation du besoin fondamental
- 2 La détermination du cycle de vie du produit
- 3 La détermination des milieux extérieurs
- 4 La détermination des fonctions de service par l'outil « Pieuvre »
- 5 La caractérisation des fonctions de service.

L'analyse du besoin fondamental de MES nous oblige à répondre aux 3 questions :

A qui rend-t-il service ? Aux chercheurs et expérimentateurs dans le contexte d'un projet de recherche et développement.

Dans quel but développer le MES ? Réaliser une expérimentation. La validation du besoin en MES découle en réalité de la validation du besoin en expérimentation.

Sur quoi agit-il ? Le système physique à étudier. C'est la matière d'œuvre que le MES doit transformer.

Un MES, produit du type « système », exige une analyse des séquences et des états qui n'est pas un exercice facile, ni pour le concepteur, ni pour le chercheur. Pour faire cette analyse, les outils méthodologiques existants comme ceux proposés par APTE [LEMOIGNE 90] s'appuient sur des procédés connus pour concevoir des systèmes de fabrication. L'utilisation de ces outils dans un contexte où les connaissances du processus (dans notre cas le phénomène expérimental) sont une énigme, ne peuvent être conventionnelles.

La détermination du cycle de vie et des milieux extérieurs du MES est une phase simple et compliquée à la fois. Simple car la vie des MES est souvent courte, et prédéterminée par le chercheur. Simple également car son développement et sa destruction sont ceux d'un produit unitaire. La complication réside dans l'identification des éléments qui constituent l'environnement du MES et qui se trouvent en situation d'interagir avec lui. Par manque de connaissances dans le domaine scientifique, le concepteur ne peut pas identifier tous les éléments du milieu extérieur qui interviennent dans le cycle de vie du MES. Le chercheur, par contre, n'est pas en position de réaliser cette analyse par manque de connaissances et de savoir – faire en conception.

Mais il est plus grave encore de constater que certains facteurs perturbateurs ne sont pas communiqués et donc pas mentionnés dans l'AF. Cet oubli concerne les facteurs perturbateurs qui proviennent de l'environnement des MES, qui interviennent sur le phénomène expérimental et non pas directement sur le MES. Ainsi, la liste des éléments du milieu extérieur est donc loin d'être exhaustive, ce qui entraîne une identification incomplète des fonctions de service et de contrainte.

Pour un meilleur résultat de l'Analyse Fonctionnelle Externe, il est donc souhaitable d'avoir des outils méthodologiques « supports » de l'échange entre le concepteur et le chercheur afin d'obtenir les informations nécessaires pour une élaboration plus complète du cahier des charges.

L'imprécision dans l'expression du besoin des chercheurs n'est pas un cas particulier. « L'expression du besoin du client est souvent présentée de façon générale, imprécise, et très optimiste. L'Analyse Fonctionnelle Externe exige une caractérisation des fonctions sous forme de critères d'appréciation. C'est une façon de déterminer les performances nécessaires au futur produit afin de satisfaire le besoin. YANNOU et son équipe ont proposé une analyse plus précise de la caractérisation des fonctions sous forme de courbes de satisfaction du client. Cette analyse permet l'enrichissement du cahier des charges par un modèle de satisfaction détaillé [YANNOU 99], [LIMAYEM 00]. En revanche, la répartition de ces critères à des fonctions finales (fonctions feuilles) dans l'arborescence n'est pas facile à valoriser » [YANNOU 98] et dans la plupart des cas, on se fie aux expériences.

La caractérisation des fonctions dans le développement des MES rencontre entre autre les difficultés liées à l'incertitude du comportement du système physique à étudier. Cette difficulté est inévitablement liée au fondement de l'expérimentation qui est l'étude du comportement de ce système.

Le problème du cahier des charges incompréhensible nécessite une meilleure traduction du besoin. La première étape de la méthode QFD vise à résoudre ce problème.

4.2.2 Quality Function deployment (QFD)

La technique de QFD (Quality Function deployment) permet d'intégrer la demande (ou le besoin) du client tout au long de la conception. « Il s'agit d'une méthode pour introduire la qualité dès le stade de la conception, afin de satisfaire le client puis de traduire les exigences des clients en objectifs de conception... » [AKAO 93, p. 3].

Le « diagramme de déploiement de la qualité demandée » permet de traduire et d'analyser les informations communiquées par les consommateurs sur les qualités qu'ils souhaitent. Pour mener à bien cette analyse, le concepteur doit acquérir certaines connaissances sur les consommateurs et le domaine d'utilisation du produit.

Dans le cas du développement des MES, le concepteur doit, dans une période très brève, acquérir les connaissances nécessaires dans un domaine pointu de la recherche qui n'est pas le sien. Même avec l'aide du chercheur, cet exercice reste une difficulté pour le concepteur, surtout quand, dans un champ très vaste de la recherche, on ne sait pas trier les connaissances nécessaires pour le développement du MES. C'est ici qu'on doit optimiser les échanges de connaissances nécessaires et suffisantes pour la conception de MES.

A côté des outils méthodologiques connus et normalisés comme l'Analyse Fonctionnelle et QFD, les travaux récents sur l'analyse du besoin sont orientés vers des domaines plus spécifiques. Dans le domaine du développement des machines spéciales, l'équipe Ingénierie de Fabrication (IFAB) de l'ENSAM de Metz avec la collaboration du MECANICA, antenne régionale du CETIM, se sont penchés sur le problème d'élaboration du cahier des charges. Ils ont proposé un outil d'aide à la conception qui s'intitule « *Stratégie d'Elaboration et de Maîtrise du Cahier Des Charges* » [ABT 00], [LOSSANT 00], [MARTIN 04].

4.2.3 Stratégie d'Elaboration et de Maîtrise du Cahier Des Charges

C'est un outil méthodologique spécifiquement développé pour la conception des machines spéciales pour lesquelles l'application des normes [NF X 50-150 ; NF X 50-152 ; NF X 50-153] ne suffit pas [ABT 00]. Cet outil s'inscrit dans le cadre de la gestion du processus de conception appliqué à des produits complexes et unitaires.

Cet outil est dédié à une étude de préconception qui va de l'expression du besoin jusqu'à l'entrée en partenariat en passant par la traduction du besoin (ou la recherche des concepts) et par l'analyse du plan d'action. L'expression du besoin, selon cet outil méthodologique, doit permettre d'élaborer un document dans lequel est exprimé le besoin initial au travers du cahier des charges du client puis le cahier des charges fonctionnel, en vue de déclencher un appel d'offre. Cette métaphase est découpée en 4 phases : identification, perception, description et analyse fonctionnelle.

Un des points essentiels de cet outil est de permettre une concrétisation progressive du cahier des charges au cours de l'avancement du projet avec l'évaluation permanente des risques potentiels. A l'aide d'un progiciel de gestion, il permet au concepteur d'assurer la maîtrise et la capitalisation de ses informations. Son utilisation permet de gérer un flux important de données et de structurer des informations techniques. Cette méthode permet une « co-élaboration » du cahier des charges afin de bien s'assurer de la compréhension des différents aspects techniques, économiques et juridiques. [ABT 01].

Un outil comme « SEMCaDeC » qui permet une communication aisée entre le client et le fournisseur, sa concrétisation progressive au cours de l'avancement du projet avec une évaluation permanente des risques potentiels, peut être intéressante si il est adapté aux MES. Malheureusement, il ne permet pas de prendre en compte les caractères particulières liées aux expérimentations des MES.

Tous ces outils méthodologiques, bien qu'ils ne résolvent que partiellement les difficultés dans l'expression du besoin d'expérimentation, constituent une base importante pour concevoir nos solutions.

4.3 Répartition du coût et des performances dans la structure de MES

Un commentaire de la norme [NF X 50-150] précise : « Une des spécificités de la démarche AV réside dans la prise en compte simultanée des fonctions et des coûts ». Pour ce faire, l'AV doit passer de l'espace fonctionnel à l'espace de solutions puis évaluer le coût.

Dans l'espace fonctionnel correspondant à la phase 3 de l'AV, ce qui complique l'évaluation du niveau d'importance relative des fonctions réside dans les critères d'appréciation des fonctions ou plus précisément dans leur taux d'échange. Ils sont valorisés grâce à des outils comme le Brainwriting, le tri croisé [ADA 85], [DEL 91], [JAO 94] [YANNOU 98]. Mais « cette valorisation est très dépendante des sensibilités et des cultures propres de l'équipe » [TOLLENAERE 98, p. 92].

Dans l'espace de solutions, à la phase 5 de l'AV, la méthode QFD qui nous offre l'outil « maison de la qualité » permet d'identifier les incompatibilités de sous-solutions. La « matrice d'évaluation des solutions » permet de comparer globalement la satisfaction afférente aux diverses solutions afin de choisir la ou les solutions adéquates [AKAO 93].

Le BDF (Bloc Diagramme Fonctionnel) et le TAF (Tableau d'Analyse Fonctionnelle) sont des outils de l'Analyse fonctionnelle Interne (AFI). Ils sont utilisés pour optimiser le coût de la solution (ou de quelques solutions) déjà évaluée en supprimant les composants inutiles dans les « Chaînes Fonctionnelles de Conception ». Le TAF permet d'analyser l'adéquation entre la solution et les fonctions externes, de calculer les coûts affectés à ces fonctions et de comparer le « coût juste nécessaire » et le « coût inutile ».

Le « coût juste nécessaire » peut-il encore être optimisé ?

Dans une solution donnée, chaque fonction de service est assurée par un ensemble de fonctions techniques qui ont des interactions entre elles. L'interaction ne se situe pas au niveau des fonctions mais au niveau des critères d'appréciation. Ces interactions sont parfois contradictoires, parfois complémentaires. Prenons l'exemple de l'aspirateur (Fig. 18) :

Fig.22.

Ft1

Aspirer la poussière

FP1

Dépoussiérer une surface

Ft

...

Ft112

Créer le flux aérodynamique

Pour enlever la poussière

Ft111

Créer le vide

Ft11

Aspirer la poussière

Ft12

Filtrer la poussière

Pompe à vide

Embut d'aspiration

Ft13

Stocker la poussière

Extraire du diagramme FAST de l'aspirateur.

La fonction aspirer la poussière Ft_{11} est assurée par les deux fonctions « Créer le vide » Ft_{111} et « créer le flux aérodynamique pour enlever la poussière » Ft_{112} . La courbe de débit/dépression de la fonction Ft_{111} , en interaction avec la forme et le caractère aérodynamique du flux de la fonction Ft_{112} , influencent les critères de capacité d'enlever la poussière (les types de surface, type de poussière, la propreté de la surface dépoussiérer, ...) de la fonction mère Ft_{11} . Donc pour améliorer la fonction mère, il y a une multitude de combinaisons possibles. Malheureusement, dans l'AV, la répartition des charges de la fonction mère vers les fonctions filles de la solution cherchée se fie aux compétences du concepteur et reste encore relativement intuitive.

En travaillant sur l'aspect fonctionnel du produit, l'AV permet de réduire les composants inutiles. Mais avec un BDF optimal selon la définition de l'AV, dont aucun composant ne peut plus être supprimé, la solution peut toutefois encore être optimisée. Reprenons l'exemple de l'aspirateur ci-dessus. Pour une capacité de dépoussiérage donnée, en ne supprimant aucun composant, on peut : soit avoir une performance maximale de la pompe et un embout d'aspiration avec une forme très simple, soit un débit de pompe relativement faible mais un embout d'aspiration spécial qui avec sa forme aérodynamique plus complexe réduit au minimum la perte d'énergie et accélère le flux au contact du sol ou encore améliore les deux composants en même temps. La stratégie retenue influence directement les coûts des composants et d'une manière générale, elle influence le coût juste nécessaire de la fonction principale de l'aspirateur. Cette réflexion est aussi valable pour les coûts inutiles des chaînes fonctionnelles de conception (les boucles fermées du BDF).

Comme exposé dans l'exemple de l'aspirateur ci-dessus, la répartition cohérente en performances permet d'optimiser la solution. Ce niveau d'optimisation de la solution n'est pas jusqu'alors étudié dans le domaine de la recherche méthodologique en conception de produit. Les méthodes existantes ne permettent pas d'atteindre cet objectif et donc ne permettent pas de palier l'incohérence dans la structure des MES.

4.4 Prendre en compte le contexte de développement et les caractères spécifiques des MES

Dans le domaine de développement des systèmes de production et des machines spéciales, les études récentes [ABT 00], [MARTIN 99], [LOSSENT 97], démontrent un manque d'outil méthodologique pour la conception des produits unitaires. Selon eux, « les recherches actuelles dans le domaine de la conception s'intéressent essentiellement aux produits de grande série et rarement aux produits unitaires » [ABT 00]. Les moyens d'expérimentation en font partie et nos analyses dans le chapitre 2 renforcent cette constatation.

Une action AV nécessite un spécialiste interne à l'entreprise ou issu d'un cabinet de conseil. Pour être efficace, le groupe de travail pluridisciplinaire doit rassembler de 6 à 10 personnes qui souvent n'existe pas au sein des laboratoires.

On comprend qu'une telle importance de moyens occasionne un surcoût lié à l'action AV que le caractère unitaire des MES permet rarement d'amortir. Le contexte du laboratoire ne favorise pas non plus le recours à une Action AV dont le coût peut être comblé grâce aux quantités fabriquées et qui est donc surtout adaptée aux produits industriels.

Même dans les projets qui rassemblent les conditions favorables à l'application de l'AV, la cohérence dans la répartition du coût et des performances est confiée à l'expérience du concepteur. Dans les domaines émergents de la recherche et dans l'innovation technologique, les concepteurs des MES n'ont en général pas acquis suffisamment d'expériences sur le sujet. Ce qui explique les re-conceptions successives et la non-optimisation des MES développés.

5 Conclusion - Problématique de notre recherche

L'étude bibliographique que nous avons présenté dans ce chapitre, a permis d'identifier les références méthodologiques sur lesquelles nous nous appuyons pour réaliser nos travaux de recherche. Ci-dessous quelques points essentiels :

Le processus de conception des MES n'est pas différent des autres produits. Il doit aussi être constitué de 4 grandes phases : la traduction du besoin, la recherche de concepts, la définition du produit et la validation du produit. Compte tenu du fait que le contexte de développement des MES est très proche de celui des petits projets dans les PME-PMI, l'approche systémique est très adaptée pour modéliser la conception de ce type de produit. Nous citons comme référence la démarche de conception « CPN ».

Mais le problème réside dans la façon de réaliser les différents phases de cette démarche. C'est au niveau des méthodes et des outils d'aide à la conception. L'objectif de notre recherche pour le développement des MES est le même que celui visé par la méthode d'Analyse de la Valeur. Mais les analyses effectuées dans ce chapitre démontrent que les normes *NF X 50-150* à *NF X 50-153* tel qu'elles sont pratiquées pour les produits industriels classiques, ne sont pas adaptées aux MES. Autrement dit, les méthodes et les outils de conception présentés dans ces normes ne sont pas pertinents pour le développement des MES.

Cette conclusion, avec la problématique du terrain expérimental, a permis d'établir la problématique de notre recherche méthodologique :

Le manque d'outils méthodologiques adaptés au contexte de développement et aux caractères spécifiques des MES ne permet pas d'affronter les difficultés de conception à l'origine d'une qualité insuffisante. Les MES développés ne sont pas optimaux en terme de coût, de performance et de délai.

Les analyses ci-dessus nous ont permis, entre autres, d'identifier les voies de résolution du problème. Pour surmonter le manque d'expériences dans le développement des MES, il est essentiel d'avoir un support méthodologique qui permette au concepteur d'assurer la maîtrise et la capitalisation des informations scientifiques concernant l'expérimentation. **Pour une meilleure traduction du besoin du chercheur, les concepteurs doivent se doter d'une méthode de communication structurée et ciblée qui leur permet d'acquérir les connaissances nécessaires et suffisantes dans le domaine de la recherche expérimentale.** Donc il est particulièrement nécessaire d'analyser préalablement l'expérimentation à réaliser avant de lancer une analyse fonctionnelle d'un MES.

Dans l'objectif d'améliorer le rapport coût – performance, la solution adéquate est de rendre cohérente la répartition du coût et des performances dans la structure du MES. **Avec l'appui de la méthode d'Analyse de la Valeur, les analyses doivent agir non pas au niveau fonctionnel mais au niveau des performances et des critères d'appréciation afin de détecter les incohérences en coût - performance du MES et de les équilibrer.**

Le développement de ces idées nous a permis de construire nos hypothèses de résolution. Elles sont à l'origine d'une nouvelle démarche de conception pour les MES que nous présenterons dans la deuxième partie.

Deuxième partie

Hypothèses - premier modèle de la démarche

Introduction – hypothèse de base

Les analyses dans la première partie nous ont montré que le contexte du développement des MES dans les laboratoires de recherche et dans les PME-PMI n'est pas adapté à l'application des méthodes de conception trop sophistiquées par rapport à la rentabilité qu'elles sont susceptibles d'apporter. Ces structures ne disposent pas d'équipes spécialisées dans le développement des MES, leur pratique méthodologique est occasionnelle, et leurs expériences en conception sont peu nombreuses. Ce contexte exige une application simple, pratique, flexible et peu coûteuse de la démarche de conception pour les MES. Ainsi, en répondant à la problématique énoncée dans la première partie, nous proposons l'hypothèse de base suivante :

Proposition d'une démarche de conception adaptée aux moyens d'expérimentations spécifiques en tenant compte de leurs particularités, de leur niveau de complexité et du contexte de développement.

Cette proposition constitue un préambule à cette deuxième partie du document, consacrée à la recherche des solutions pour résoudre les problèmes cités ci-dessus.

L'étude de la problématique de terrain expérimental permet d'identifier deux problèmes majoritairement rencontrés dans le développement des MES : un écart entre le besoin expérimental et la capacité du MES développé ainsi qu'une non-optimisation en coût – performance – délai. C'est pour ces raisons que l'on décline l'hypothèse de base en deux sous-hypothèses, l'une propose une analyse de l'expérimentation visant l'élaboration du cahier des charges fonctionnel, l'autre propose une analyse de la répartition des performances. Elles débouchent sur deux outils nouveaux que nous les appelons : « l'ANalyse de l'EXpérimentation Orientée Fonctionnelle » (ANEXOF) et « l'Analyse de la Cohérence en Coût - Performance » (ACCP).

L'ANalyse de l'EXpérimentation Orientée Fonctionnelle (ANEXOF) développée dans le chapitre 4 ci-après exploite le besoin du chercheur et définit le cahier des charges fonctionnel. Elle est basée sur l'analyse fonctionnelle, associée à l'analyse du modèle expérimental dans la démarche de l'expérimentation. Elle fait le lien entre les connaissances scientifiques du chercheur, les connaissances en conception et les savoir-faire technologiques du concepteur.

L'ACCP, développée dans le chapitre 5, intervient à partir de la phase de conception préliminaire. Son but est de rendre plus cohérent la structure d'un produit du point de vue des performances et des coûts qui leur sont dédiés.

Le premier modèle de la démarche, présenté dans le chapitre 6, est construit en intégrant ces nouveaux outils dans la méthode générale de conception de produits. Il permet de mieux prendre en compte les particularités des MES, de faciliter les échanges entre le chercheur et le concepteur, et ainsi de concevoir un MES « bon du premier coup ».

Nous verrons que cette démarche ne demande pas de formation lourde, qu'elle est adaptée au contexte de la recherche et de l'industrie. Elle est flexible au sens où elle peut également être adaptée à la stratégie budgétaire et au niveau de complexité du projet. Elle peut être pragmatique mais permet aussi d'intégrer des outils de calcul et de simulation plus complexe.

Grâce à l'association des deux outils méthodologiques que nous présenterons ensuite, cette démarche est un guide destiné aux équipes de développement des MES issues de différents domaines de la recherche.

chapitre 4

Analyse de l'expérimentation orientée fonctionnelle

1 Introduction – Première sous - hypothèse

Le premier problème identifié dans le développement des MES est la mauvaise traduction du besoin et la définition incomplète et imprécise du cahier des charges fonctionnel.

Dans la démarche expérimentale, l'analyse de l'expérimentation permet une détermination claire du système à étudier et de son environnement. Afin d'élaborer le cahier des charges du MES, elle représente une source d'informations très pertinentes qui peuvent servir de complément à l'analyse du milieu extérieur du MES et à l'analyse des séquences et des états de l'expérimentation. Une voie de résolution de notre problème est donc l'intégration de la phase « Analyse de l'expérimentation » de la démarche expérimentale dans le processus de conception des MES.

La première sous - hypothèse est donc :

Proposition d'une « analyse de l'expérimentation orientée fonctionnelle », qui permet d'associer l'analyse du modèle expérimental et l'analyse fonctionnelle afin d'élaborer un cahier des charges fonctionnel plus complet, plus précis et compréhensif.

Cet outil permet aux concepteurs d'acquérir des connaissances spécifiques dans le domaine de recherche, nécessaires et suffisantes, en vue d'améliorer sa compréhension du besoin des chercheurs. En rassemblant les deux acteurs principaux (chercheurs et concepteurs), nous éviterons les incompréhensions liées à une différence de vocabulaire technologique. Nous optimiserons les échanges de connaissances scientifiques et d'expériences technologiques.

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les fondements de notre outil, et puis son « mode d'emploi ».

2 Principe de l'analyse.

Actuellement, le besoin expérimental est identifié par le chercheur et par la suite le besoin de développement du MES est défini par le concepteur. Ce découpage d'analyse du besoin en deux parties indépendantes fait perdre des informations dont certaines peuvent être stratégiques pour le développement des MES.

La phase de l'analyse fonctionnelle utilise le modèle expérimental défini par le chercheur pour identifier les fonctions. Ce modèle ne mentionne que les paramètres principaux du phénomène à étudier et ignore tous les autres paramètres auxquels ne s'intéresse pas le chercheur et qui du point de vue de la conception ne sont peut être pas anodin. Cette situation ne pourra être évitée que si le concepteur a pris connaissance de l'analyse faite par le chercheur. C'est la raison pour la quelle nous fusionnons les deux analyses dans une démarche unique : l'Analyse de l'Expérimentation Orientée Fonctionnelle.

En associant les deux premières phases de la démarche de l'expérimentation (chapitre 3, §1.) avec l'Analyse Fonctionnelle Externe nous construisons notre méthode d'« **Analyse de l'Expérimentation Orientée Fonctionnelle** » (ANEXOF) qui se décompose en 5 étapes (Fig. 23).

Après l'étape de formalisation du problème expérimental, la définition du modèle expérimental repose sur deux étapes : la définition des flux d'entrée et de sortie et la définition des facteurs perturbateurs.

Ces trois étapes reposent sur l'analyse du modèle expérimental de la démarche de l'expérimentation. La modification importante par rapport à l'existence porte sur la composition de l'équipe qui marque la présence des concepteurs. Son rôle dans ces étapes

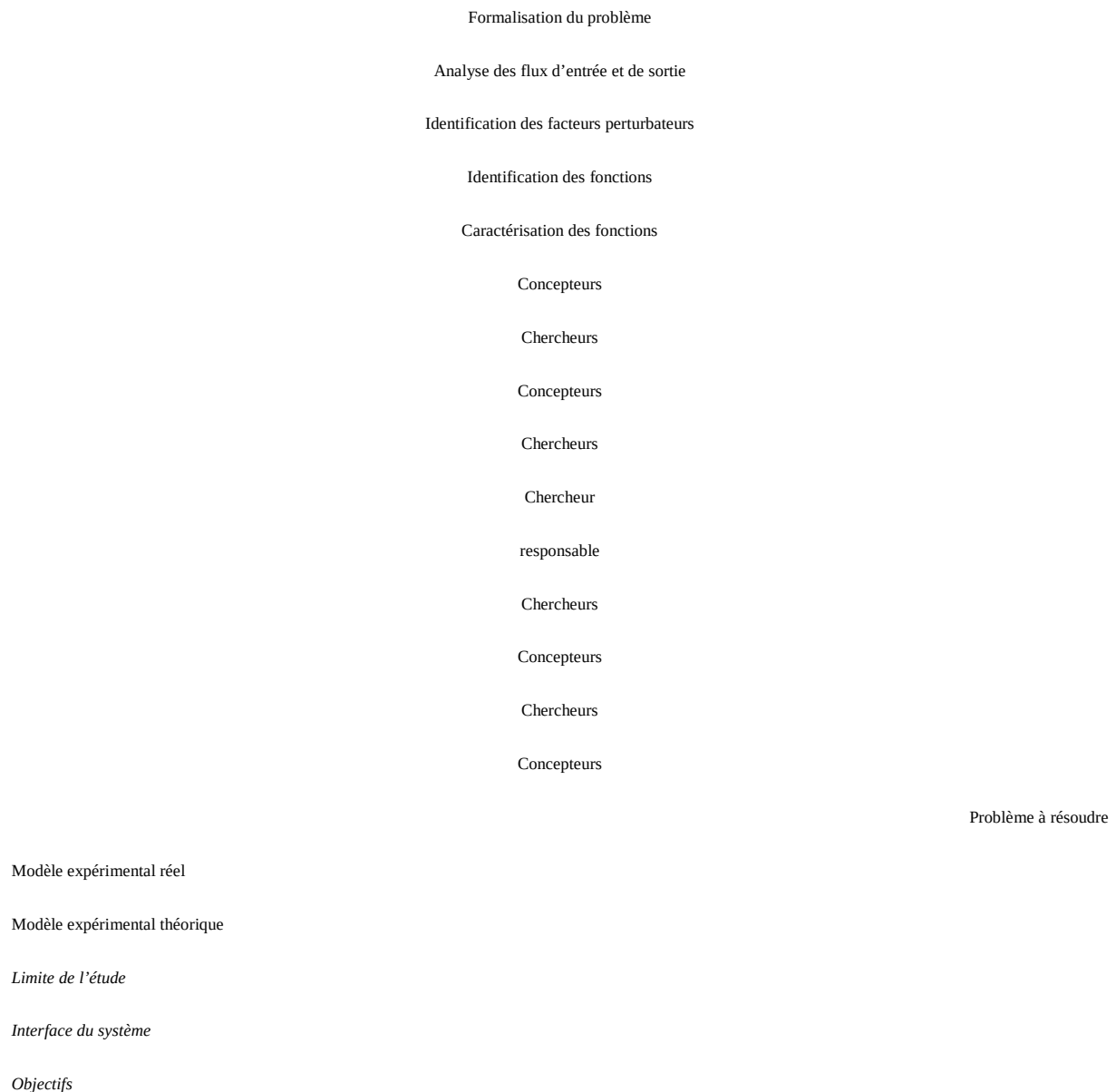
n'est pas seulement d'acquérir les informations nécessaires pour la compréhension de l'expérimentation mais aussi d'apporter des critiques de faisabilité et des connaissances de l'environnement technique pour l'analyse des facteurs perturbateurs. Une autre amélioration que nous proposons dans la première étape est l'application de l'approche systémique dans l'analyse du système à étudier.

Les deux dernières étapes consistent à traduire ce modèle expérimental en cahier des charges fonctionnel. Elles s'appuient sur l'Analyse Fonctionnelle pour l'identification et ensuite la caractérisation des fonctions. Elles permettent la transition de l'espace expérimental du chercheur à l'espace fonctionnel du concepteur.

Fig.23.

DEFINITION DU MODELE EXPERIMENTAL

ELABORATION DU CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL



Liste des fonctions

Cahier des charges fonctionnelles

Moyens: budget, délai, matériels

Système à étudier

Hypothèses

Connaissances existantes

Décision du besoin un nouveaux MES

Décision

Méthode d'analyse de l'expérimentation orientée fonctionnelle (ANEXOF).

Actigramme A0 des phases (SADT)

Dans le paragraphe suivant, nous développons cette méthode sous forme d'un guide. C'est le « mode d'emploi » de l'ANEXOF dédié aux chercheurs et aux concepteurs dans l'aventure du développement de MES et de l'avancement de la recherche et de l'innovation.

3 Mode d'emploi de l'ANEXOF

3.1 Formalisation du problème

La formalisation permet de valider le besoin d'expérimentation par une définition du problème, qui le situe dans son contexte de recherche et face aux objectifs à atteindre. En

s'appuyant sur la phase 1 de la démarche de l'expérimentation, cette étape permet d'aborder les points suivants :

3.1.1 Identification du besoin d'expérimentation.

Le chercheur est le responsable de cette décision. Il doit **identifier clairement le problème à résoudre**. Ça peut être un problème industriel (Exemples : le bruit d'un moteur est trop fort, la qualité d'un procédé n'est pas stable, un produit nouveau doit être testé ...) ou un problème de la recherche scientifique (Exemples : Quel est le mécanisme de la rupture d'un type de composite? Quels sont les causes de la fatigue des conducteurs automobile ? Le boson de Higgs existent-ils ?...)

Il doit **justifier que l'expérimentation est la meilleure façon de trouver la réponse** à ce problème.

3.1.2 Définition du but de l'étude et des objectifs à atteindre

Préciser le but visé. Selon le niveau de connaissances sur le système à étudier, le but d'une expérimentation doit être identifié et classé dans une des quatre catégories définies dans le §2.4 du Chapitre 1.

Exemple :

- Pour un phénomène méconnu, le but est tout d'abord de savoir comment il se manifeste et quelles sont les causes de son déclenchement. On entre dans le cadre des expérimentations de « découverte ».
- Le but peut aussi être de définir comment et dans quelles mesures elles déclenchent le phénomène, ainsi que les autres facteurs qui vont l'influencer. Ici, on se place dans le cadre des expérimentations de « caractérisation ».
- Si le phénomène qui se manifeste est déjà étudié dans ses aspects généraux, alors, dans un contexte donné, le but peut être de chercher une solution optimale pour un besoin d'application ou une solution qui satisfasse les contraintes liées à ce contexte. Ce sont des expérimentations de la catégorie « optimisation ou spécification ».
- Le problème peut être de valider un produit ou un procédé dont les critères de validation sont déjà connus (par exemple un cahier des charges), et pour lequel le modèle est présenté sous forme de « boîte noire » avec ses paramètres d'entrée et de sortie prédéterminés. Le but des expérimentations est donc de valider ce modèle et non pas de chercher une corrélation entre ces paramètres. Ce sont des expérimentations de « validation ».

Dans un projet, on peut être amené à faire des études expérimentales de différentes catégories, en particulier quand le contexte d'utilisation ou les critères de validation sont encore méconnus.

Problème

Etude

Définir les limites et les contraintes de l'étude. Les contraintes de budget, de délai et surtout des acquis technologiques mis à disposition imposent la limite de l'étude.

Fig.24. Limite de l'étude.

Cette limite n'est pas figée car au cours de l'analyse du besoin, des nouvelles informations peuvent la modifier.

Définir ces objectifs par des phrases courtes et claires. Ici, on précise le but de l'étude par des objectifs concrets, exemple : à quel régime le moteur fait le plus de bruit, définir les facteurs qui influençables le plus le bruit, réduire le bruit du moteur en maîtrisant ces facteurs...

Quantifier les objectifs. Exemple : citer au moins 3 facteurs qui influencent le bruit, réduire le bruit du moteur à moins de X dB...

Les classer dans l'ordre prioritaire. Les objectifs ont des impacts plus ou moins importants sur l'état d'avancement de la recherche. Le chercheur expose sa stratégie en classant les objectifs par ordre de priorité.

3.1.3 Définition des moyens nécessaires

Définir le besoin en moyens d'essais, le budget et le délai pour les réaliser. Toutes les expérimentations ne nécessitent pas nécessairement des moyens d'essais. C'est dans cette étape que l'on définit s'il est indispensable ou non de s'équiper d'un MES nouveaux.

3.1.4 Définition de l'interface entre le système à étudier et son milieu extérieur

Pour cela, il faut faire la distinction entre le système à étudier et son milieu extérieur. Selon la définition de l'expérimentation, le système est l'objet de l'expérimentation. Il est mis en situation pour créer le(s) phénomène(s) afin d'étudier ses réactions. Dans tous les cas, le système est la partie que l'on s'efforce de protéger et de ne pas influencer au cours de l'essai. Son milieu extérieur représente tout ce qui l'entoure et sur lequel on intervient pour créer « la situation » désirée.

Identifier le système à étudier. Il doit être concret et précis. Exemple : le moteur dont il faut étudier le bruit est du type XXX, le procédé à étudier agit sur telle ou telle matière d'œuvre.

La définition de la frontière du système à étudier dépend de l'objectif d'expérimentation. Par exemple, pour étudier une maladie, si l'objectif est de comprendre le mécanisme de la maladie, les organes concernés par la maladie constituent le système à étudier. Par contre, si l'objectif de l'étude est de connaître l'influence du mode de vie (les nourritures, le cycle de repose etc.) sur le mécanisme de la maladie, le système à étudier est le corps tout entier.

Dans beaucoup de cas, le système à étudier est différent de l'échantillon. Dans le domaine de la mécanique des matériaux, par exemple, l'échantillon comporte deux parties. La première est le système à étudier (la zone d'observation par exemple) ; la deuxième partie est le milieu extérieur que l'on aménage pour faciliter l'expérimentation (pour tenir, pour transmettre les efforts, etc.).

Cette distinction est importante pour déterminer le système physique « strict nécessaire » pour étudier le phénomène. Elle permet d'identifier et de réduire au strict minimum les perturbations non souhaitables internes au système sur le phénomène à étudier.

Cette définition est issue de l'approche des systèmes appliquée au modèle expérimental. Elle permet une certaine clarté dans l'analyse du système à étudier. C'est un point innovant dans notre analyse puisque les analyses existantes (chapitre 3 §1) identifient le système à étudier comme un support physique pour l'expérimentation donc dans plupart des cas identique à l'échantillon.

Cette étape est très profitable au concepteur de ME et à l'expérimentateur. La frontière entre le système physique d'expérimentation et son environnement permet d'identifier la zone d'action du concepteur : c'est tout l'environnement extérieur du système. Elle permet ensuite à l'expérimentateur d'analyser les interactions entre le système et son environnement et aussi au concepteur de ne pas oublier de maîtriser le milieu extérieur au alentour de ce système.

3.2 Définition du modèle expérimental

Il est défini par le chercheur avec la participation du concepteur et de l'expérimentateur. Elle fait apparaître la première version du modèle d'expérimentation.

3.2.1 Analyse des flux d'entrée et de sortie

Cette étape permet l'élaboration d'un modèle du type « boîte noire » (Fig. 25).

Fig.25.



Milieu extérieur

Flux d'entrée

Flux de sortie

La boîte noire de l'expérimentation.

Le flux d'entrée est un ensemble de facteurs (paramètres) principaux à faire varier ou à maîtriser. Selon l'objectif de l'étude, ce sont les paramètres susceptibles de déclencher les phénomènes souhaités et de faire varier l'intensité de ses réponses en fonction de l'objectif de l'étude.

Le flux de sortie est constitué des réponses que l'on souhaite connaître. Ce sont des informations qui comprennent des observations, des paramètres mesurés, des réactions détectées au cours de l'essai. Ce sont des informations nécessaires pour trouver la solution au problème de l'étude.

Par exemple, pour étudier l'influence de la température sur la polymérisation d'un composite, les paramètres d'entrée sont :

- les paramètres déclenchants : les substances du composite, leur proportions, la façon et la vitesse de mélange, la pression de mise en forme, etc.
- les paramètres influents : la source de chaleur, sa température, le principe de diffusion de la température, etc.

Et les paramètres de sortie peuvent être : le temps et le niveau de polymérisation, l'homogénéité de la matrice polymère, l'état de surface du composite, etc.

Selon la catégorie d'expérimentation à laquelle appartient l'étude, les paramètres d'entrée et de sortie sont plus ou moins évalués. Dans le cas des expérimentations de découverte, par exemple, les paramètres d'entrées sont souvent des paramètres déclenchants et les paramètres de sortie sont souvent des observations qualitatives. Hors dans le cas des expérimentations de validation d'un produit, les paramètres d'entrée et de sortie sont déterminés préalablement dans le cahier des charges du produit.

Construction de la « boîte noire »

Une fois que tous les éléments de la boîte noire sont identifiés, nous pouvons construire le modèle de la boîte noire. Cette construction n'est autre que la transcription rigoureuse et précise des objectifs ci-dessus en flux d'entrée et de sortie.

La « boîte noire », première concrétisation de l'objectif du MES, permet au concepteur de donner un avis sur la faisabilité technique.

Jusqu'ici, l'acteur principal est le chercheur, les concepteurs ne jouent qu'un rôle de conseil par rapport à la faisabilité technologique de ses choix. Mais c'est dans ces premières étapes que le concepteur va prendre connaissance du contexte scientifique du produit à concevoir, de ses fonctions principales et de la limite de la zone d'intervention.

3.2.2 Identification des facteurs perturbateurs du phénomène à étudier

Cette étape est une des plus importantes dans l'analyse de l'expérimentation car elle assure la validation du phénomène créé par rapport au phénomène souhaité et permet l'évaluation des écarts entre les valeurs mesurées et la réalité.

A cette étape, on analyse l'interaction entre le système à étudier et son milieu extérieur (Fig. 26). C'est à dire identifier les influences du milieu extérieur sur le système et les sources d'influences du système sur le milieu extérieur.

Fig.26.



Flux d'entrée

Flux de sortie

Graphe des interactions.

Le milieu extérieur se trouve au-delà de la limite du système à étudier. Le terme « *milieu extérieur* » est très global. Il regroupe tout ce qui, au sens le plus large, est présent dans l'environnement de l'expérimentation et qui est susceptible d'influencer le phénomène à étudier. Par exemple : la nature de l'atmosphère (humidité, pression, température etc.), la proximité d'autres machines, la gravité, le champ magnétique local, la lumière, la présence de population, etc.

Cette analyse est issue de la démarche de l'expérimentation. Elle permet d'identifier les éléments perturbateurs, de les saisir, de les caractériser et ensuite de les classer en catégories afin de mieux les maîtriser.

Identifier les éléments perturbateurs. Le but est d'identifier les éléments du milieu extérieur susceptibles de perturber le bon déroulement de l'expérimentation. Parfois, cela demande des études très poussées, notamment, dans des domaines spéciaux comme la recherche spatiale ou sous-marine. Ces études ont pour but de répondre aux questions suivantes : quels sont les éléments du milieu extérieur qui peuvent avoir des influences non désirables sur le phénomène ? A quel niveau de certitude ?

Les outils de créativité comme le brainstorming peuvent aider à l'identification des éléments du milieu extérieur.

Saisir et caractériser les facteurs perturbateurs. Les hypothèses de toute nature permettent de saisir les facteurs perturbateur à étudier et de rendre l'expérience insensible aux autres facteurs. Dans le cas, où la quantité des facteurs perturbateurs est importante, les expérimentations « pour voir » que l'on connaît aussi sous le terme « débroussaillage » [LEGENDRE 97], sont nécessaires afin de filtrer les facteurs peu influents.

Pour chaque interaction, on doit répondre aux questions suivantes :

- • Peut-elle avoir une conséquence grave ?
- • A quel niveau de certitude ?
- • Est-il nécessaire de l'analyser préalablement par un essai « débroussaillage » ?
- • Faudra-t-il la prendre en compte ?
- • Doit-on les réduire ou les maîtriser?

Classer les facteurs perturbateurs. Les facteurs perturbateurs sont classés en plusieurs catégories selon leur influence sur le phénomène :

Le facteur bloc représente une condition d'expérimentation qui va inévitablement varier au cours des essais. Par exemple, les échantillons extraits de deux lots de produits différents présentent des caractéristiques différentes. Les essais réalisés d'une journée à l'autre peuvent avoir des résultats différents à cause du changement des conditions externes.

Le facteur bruit (selon la définition de TAGUCHI) sont les sources de variabilité de la réponse. BENOIST a fait la distinction de trois types de facteurs bruits [BENOIST 94 page 39] :

- • les facteurs bruits « extérieurs » liées à l'environnement comme la température d'ambiance, l'humidité, etc.
- • les facteurs bruits « internes », représentent les sources de la variabilité du système à étudier lui-même comme l'encrassement d'un moteur, les imperfections dans une éprouvette,
- • les facteurs bruits entre systèmes sont les variations d'un échantillon à l'autre.

L'évolution des connaissances sur le milieu extérieur facilite l'identification de ses interactions réciproques avec le système à étudier. Cette analyse va permettre une approche progressive du modèle expérimental « théorique » vers un modèle expérimental plus réel.

L'expérimentation est au cœur des préoccupations, elle ne doit pas pour autant « polluer » l'environnement. Toutes les réactions éventuelles du système qui peuvent nuire à l'environnement, à la sécurité, doivent être signalées dans cette étape.

Cette analyse fait ressortir des éventuelles fonctions principales du second ordre. Ce sont des fonctions négociables car elles ne caractérisent pas l'apparition du phénomène souhaité.

Les acteurs de cette étape sont l'ensemble des chercheurs et des concepteurs. Le travail pluridisciplinaire, à la base de l'échange de connaissances entre ces deux acteurs, est la condition de la réussite.

3.2.3 Construction du modèle expérimental.

Le modèle expérimental doit être présenté avec tous les scénarios souhaités sans en oublier l'ordre d'apparition. Nous obtenons ici le même résultat que l'outil d'analyse des séquences et des états dans la méthode APTE pour l'identification des fonctions d'un processus [***]. En se basant sur les connaissances préalablement acquises, prévenir, pour le système à étudier, le maximum de réactions aux facteurs perturbateurs. Proposer des hypothèses sur la réponse de l'expérimentation sans en oublier la limite de validité.

Les méthodes graphiques comme SADT peuvent apporter une meilleure lisibilité pour des modèles compliqués du type procédé ou processus. Pour des expérimentations de validation d'un système, la méthode Grafcet offre une présentation adaptée.

Jusqu'ici notre attention est constamment portée sur l'expérimentation et le système physique à étudier. Cela nous permet de mieux connaître les éléments de « la bête à corne » de MES (fig. 17 ; chapitre 2). Maintenant nous sommes prêts pour passer de l'espace de l'expérimentation à l'espace de la conception.

3.3 Elaboration du cahier des charges fonctionnel

3.3.1 Identification des fonctions de service principales

A cette étape, on place le MES entre le système à étudier et son milieu extérieur (fig.27). On visualise les fonctions principales de premier ordre qui correspondent aux flux d'entrée et de sortie, et les fonctions principales de deuxième ordre qui correspondent aux interactions des facteurs perturbateur.

On peut considérer que le MES est un filtre qui ne fait passer que les flux d'entrée et de sortie. Toutes les interactions non souhaitées doivent être maîtrisées, ou évaluées, ou supprimées.

Fig.27.



Fonctions principales

de 1^{er} ordre

MES

Fonction principale de 2^{ème} ordre

Fonction principale de 2^{ème} ordre

Fonction principale de 2^{ème} ordre

Fonction principale de 2^{ème} ordre

Graphe fonctionnel

A cette étape, les fonctions principales du MES sont identifiées. Dans certains cas où l'expérimentation est nouvelle mais où les moyens de la réaliser sont existants, cette analyse permet de choisir un MES ou de justifier la nécessité d'en construire un nouveau.

3.3.2 Définition d'autres fonctions de MES.

A cette étape de la démarche, nous pouvons reprendre l'Analyse Fonctionnelle Externe pour identifier d'autres fonctions du MES. Le système à étudier et les éléments du milieu extérieur deviennent des « milieux extérieurs » du MES. on retrouve le graphe « *pieuvre* » de la méthode APTE. Avec l'outil d'analyse du cycle de vie du MES, on identifie donc les autres milieux extérieurs de la « *pieuvre* » (Fig. 28).

Fig.28.

MES

Résultats d'essais

Réponses

Tendances

Performances

Etc.

Facteurs perturbateurs

Sources d'énergie

Matière première

Etc.

Environnement

Autres.

Chercheur

Expérimentateur

Données

Facteurs

Variables Paramètres

Causes influentes

La « pieuvre » de MES.

Les interactions potentielles entre le MES et le phénomène à étudier doivent impérativement être prises en compte quand on identifie les fonctions contraintes. L'analyse de l'expérimentation ci-dessus est une source de connaissances indispensables qui permettent de révéler ces interactions.

3.3.3 Caractérisation des fonctions.

Cette étape consiste à classer les fonctions dans un ordre de priorité, à définir les critères d'appréciation et à identifier les contraintes liées au contexte du laboratoire, de la fabrication, etc.

Les analyses dans les deux premières étapes nous ont apporté des éléments de classement. Toutes les fonctions de premier ordre sont des fonctions à haute priorité. Dans l'ensemble des fonctions de deuxième ordre, le degré de gravité des facteurs perturbateurs permet d'identifier le niveau de priorité de la fonction associée.

Les courbes de satisfaction sont une façon claire et précise pour identifier les critères d'appréciation. L'objectif visé est un MES qui permettra la maîtrise de tous les paramètres d'influence. En réalité, la prise en compte des contraintes techniques et économiques définit les limites et les contraintes de l'étude. La réunion du groupe de travail permettra toutefois de réaliser une première classification cohérente. Le coût global ou budget octroyé au programme est une des principales limites à ce souhait. C'est une étape de «*négociation* » qui fait concorder le niveau des critères d'appréciation des fonctions et le budget qui y sera dédié.

Validation

Elle est plutôt à l'initiative des responsables de laboratoire qui lancent le projet. Deux paramètres décisifs sont le coût du MES et les avancées en Recherche que le MES permettra d'atteindre.

- • Elles complètent le cahier des charges ; dans ce cas, la dimension du coût objectif est indicative mais non limitative.
- • Elles complète le cahier des charges ; dans ce cas, les niveaux de performance sont indicatifs mais non imposés.

Le contexte de développement des MES dans les laboratoires de recherche est fortement conditionné par les contraintes budgétaires et de planning de la recherche.

Dans le cas où le budget disponible ne serait pas suffisant, ou dans le cas contraire où le budget disponible permet d'aller plus loin, une remise à niveau des objectifs d'expérimentation devra être envisagée. On effectue alors un retour à la phase d'analyse du modèle expérimental pour permettre l'évolution du cahier des charges qui conduira à l'évolution correspondante de la conception du MES de telle façon que l'avancement de la recherche soit optimisé.

4 Remarque.

En complément des outils d'analyse fonctionnelle, cet outil permet non seulement de mieux comprendre l'expérimentation à réaliser (étapes 1, 2 et 3) mais aussi de bien traduire les facteurs et les paramètres expérimentaux en fonctions de service et de contrainte sans perte des informations essentielles (étapes 4 et 5).

Les échanges d'informations entre les deux blocs « définition du modèle expérimental » et « élaboration du cahier des charges fonctionnel » ont évolué par rapport à la pratique actuelle. Le contenu des informations échangé, précédemment limitées au modèle expérimental théorique (la boîte noire), est non seulement beaucoup plus complet car il présente les paramètres perturbateurs qui agissent sur le modèle, mais aussi, d'une façon plus large car il présente toutes les connaissances existantes sur le sujet. Le cahier des charges doit inclure les hypothèses proposées dans le cadre de l'analyse de l'expérimentation accompagnées de leurs conditions de validation.

Il faut noter que la liste des interactions entre le MES et le phénomène à étudier n'est pas exhaustive. Le cahier des charges n'est alors pas encore complet nous l'appelons « le cahier des charges ouvert » (ou évolutif).

Cette méthode s'inspire des outils de l'analyse fonctionnelle qui permettent également de rechercher le juste besoin de l'utilisateur, de déterminer les fonctions attendues pour satisfaire ce besoin, leurs performances et valeurs associées, de prendre en compte les contraintes d'utilisation.

Elles constituent, en association avec le modèle schématique expérimental, les modalités et les hypothèses sur les interactions, la base du cahier des charges du MES.

Dans cette méthode, le rôle du concepteur est clairement identifié. Il est un acteur actif, non seulement dans la phase de l'analyse fonctionnelle mais aussi dans la phase de définition du modèle d'expérimentation. Les connaissances nécessaires pour le concepteur dans le projet sont mieux ciblées et structurées. Les éléments essentiels sont les connaissances existantes qui permettent d'identifier les facteurs perturbateurs du phénomène, les facteurs existants et potentiels ainsi que leur mode d'influence.

L'ANEXOF permet au chercheur et au concepteur de travailler ensemble sur le même support, de parler le même langage. Elle facilite le travail collaboratif et la compréhension. Nous faisons référence à la méthode SEMCaDeC « Stratégie d'Elaboration et de Maîtrise du Cahier Des Charges » [MARTIN 04] dédiée au développement des machines spéciales. La circulation des informations entre le client et le fournisseur (ici entre le chercheur et le concepteur) autour d'une méthode commune permet une meilleure compréhension. Ainsi la traçabilité des décisions et des conditions de validation est intégrée dans ces méthodes.

L'analyse de l'expérimentation orientée fonctionnelle est une association de la démarche des plans d'expériences et l'outil de l'analyse fonctionnelle. Ceci permet de faire le lien entre le chercheur avec son contexte de recherche et le concepteur avec ses connaissances technologiques. La démarche proposée est un outil pertinent pour associer les connaissances de la recherche et les savoir-faire en conception. Elle permet une formalisation de leur rapprochement. Son utilisation conduit à une vision plus transversale dans le développement des MES.

chapitre 5

Analyse de la cohérence en coût – performance

1 Introduction – Deuxième sous – hypothèse

Face au problème d'incohérence dans la structure des moyens d'expérimentation, nous nous sommes penché sur le sujet « la cohérence dans la conception de produits ».

Depuis longtemps, on intègre consciemment ou inconsciemment la notion de cohérence dans la conception mécanique. Un exemple simple : les ajustements de dimensionnement ont été étudiés pour établir le tableau des tolérances fondamentales [***]. Ce classement est une véritable application de la cohérence en précision dans la phase de cotation. Il est le résultat d'une longue expérience de nos concepteurs. Les précisions en dimensionnement des éléments d'une même chaîne de cotation ont à priori le même niveau de précision (le même indice) pour le meilleur rapport qualité/prix global. Depuis, les procédés ont subi des innovations importantes, ce tableau n'est plus à jour. De plus, le besoin d'une analyse plus fine met en cause le classement de la précision en 13 niveaux. Cela explique la création d'un nouveau concept G.P.S. (Geometrical Product Specification) et des nouvelles normes ISO/TR 14638 [AUBLIN 99]. La cohérence dans la cotation a évolué avec l'avancement des acquis technologiques et l'exigence du marché.

Rendre cohérent les performances dans la structure d'un produit est une activité qui s'exerce dans la phase de reconception. La reconception des produits existants a souvent pour but d'optimiser le coût en maintenant le niveau de performances. En fonction du retour d'expérience, de l'utilisation ou de l'évolution des technologies, les principes généraux de la reconception sont les suivants :

- **Supprimer les composants inutiles** dans les chaînes fonctionnelles de conception grâce à des analyses comme « Analyse Fonctionnelle Interne ».
- **Réduire les performances surabondantes par rapport au besoin.** Grâce au retour d'expérience, dans les produits de petit électroménager par exemple, on a détecté les composants « trop qualité » et beaucoup de pièces sont maintenant en matière plastique. L'évolution des outils de calculs permet une analyse plus précise de la structure et une détection des surdimensionnements. Dans le cas de la tour Eiffel, la structure a été entièrement auscultée, renforcée par endroits, allégée de 1340 tonnes (presque 13% de son poids).
- **Rééquilibrer la performance des éléments d'un ensemble.** Exemple : dans le domaine de l'informatique ou de l'électronique, on parle de l'« équilibrage de charge » : « Distribution de tâches ou de communications au sein d'un réseau, pour en améliorer la performance » [OLF 03]. Ces travaux rendent le réseaux plus homogène en charge.

Dans la reconception, la notion de cohérence en performance est une préoccupation des concepteurs. Mais dans la conception des produits nouveaux, les concepteurs n'ont pas d'appui méthodologique pour atteindre la cohérence. Il faut donc réaliser plusieurs versions avec une évolution progressive vers la cohérence en performance du produit.

En tenant compte du caractère unitaire et de la vie commerciale généralement courte du MES, et pour éviter des re-conceptions successives, l'intégration de la cohérence en performance dans la conception initiale est une nécessité pour optimiser le rapport coût/performance.

La deuxième sous hypothèse est :

Proposition d'une « analyse de la cohérence en coût – performance » pour optimiser la répartition du coût et des performances du MES dès la première conception.

Ce chapitre consiste à formaliser l'évaluation de « la cohérence en performances » et de « la cohérence en coût – performance ». Une démarche pour rendre cohérente les performances

dans la structure de produit sera proposée afin d'être utilisée dans le processus de conception des MES. Elle est intitulée l'Analyse de la Cohérence en Coût – Performance (ACCP)

2 Evaluation de la cohérence en coût – performance

Dans ce paragraphe, nous proposons une évaluation de la cohérence en performance et en coût – performance dans la conception de produit. Tous d'abord, nous précisons les définitions de la performance et de la cohérence telles que nous les entendons dans le cadre de cet travail.

2.1.1 Performance.

Les recherches bibliographiques sur la notion de performance nous ont fourni des définitions très différentes les unes des autres. Selon le domaine d'utilisation et le centre d'intérêt, la notion de performance prend des dimensions diverses :

Selon Le Petit Robert [Petit ROBERT 02], la performance est le résultat chiffré (d'une personne, d'un cheval, ...) obtenu dans une compétition ou le résultat optimal qu'une machine (un ordinateur, un avion, un système,) peut obtenir.

Dans le domaine de la gestion on trouve des définitions dont la finalité est de mesurer la santé de l'entreprise dans un contexte compétitif [MARMUSE 97]. Ou selon BERRAH, la performance externe et la performance interne de l'entreprise [BERRAH 02]. Dans le contexte de notre recherche, la définition qui nous intéresse est celle dédiée aux produits et aux machines :

Dans le domaine du marketing : Les performances d'un produit sont l'ensemble des fonctions et des caractéristiques perçues par l'utilisateur. [OLF 89]

Dans le domaine de la conception des machines outils. La performance d'une machine peut se distinguer en trois types [PRUVOT 93] :

- *Performances techniques.* Les capacités qualitatives comme le type de surface, de produits que la machine peut réaliser, les capacités quantitatives comme la précision, les dimensionnements des surfaces, des produits pouvant être réalisés sur la machine.
- *Performances économiques.* La capacité de production, (nombre de pièces/jour, etc.)
- *Performances de gestion.* Les paramètres nécessaires de la machine pour la gestion de production dans la chaîne où elle fait partir.

Aussi bien pour les produits que les machines, on associe toujours les performances avec les fonctions que le produit ou la machine doit remplir. La performance ne se présente pas sous forme d'une action mais sous forme d'une caractéristique, d'une capacité, d'une qualité de l'action. Nous proposons une définition de la performance d'un produit comme suit :

Les performances d'un produit sont les caractéristiques associées aux fonctions qu'il remplit au cours de son cycle de vie. Elles désignent les capacités qualitatives ou quantitatives du produit.

Cette notion de performance est très proche de la notion de critère d'appréciation dans l'Analyse Fonctionnelle. La différence réside dans le fait que les critères d'appréciation désignent les caractéristiques souhaitées d'une fonction et les performances désignent les capacités du produit pour répondre à ces souhaits. Les critères d'appréciation correspondent au besoin et les performances correspondent à la solution.

Un produit réussi est un produit dont les performances répondent au moins aux critères d'appréciation des fonctions du CdCf. Le juste nécessaire peut se traduire par une concordance parfaite entre les critères d'appréciation et les performances du produit conçu.

La notion performance peut être utilisée pour le produit et aussi pour un composant. Nous avons donc les performances globales pour le produit et les performances locales qui concernent ses composants.

2.1.2 Cohérence.

On emploie souvent le terme « cohérent » pour quelque chose qui **se compose de parties compatibles, liées et harmonisées entre elles**. « La cohérence présente une liaison, un rapport étroit d'idées qui **s'accordent entre elles**, une **absence de contradiction** » [Le Petit ROBERT 02].

2.1.3 Evaluation de la Cohérence en performance

A partir de ces définitions, nous proposons l'évaluation de la cohérence en performance dans la conception de produits :

Un produit est cohérent en performance quand il se compose de composants dont les performances sont compatibles, liée et harmonisées entre elles.

Nous distinguons deux niveaux de perception de la cohérence en performances :

Aspect global : les performances globales d'un produit **s'accordent entre elles** pour répondre à un but donné : la satisfaction du besoin.

Exemple d'une chaise, la fonction principale (le besoin origine) est de permettre de soutenir une personne dans une position assise. Un aspect de la cohérence globale en performance de cette chaise est la concordance entre le poids qu'il peut soutenir et la surface d'assise.

Aspect local (là où se trouve la répartition des performances) : chaque performance globale d'un produit **se compose de performances locales (liées à des sous-ensembles) compatibles et harmonisées entre elles**.

Jusqu'alors, la notion « compatible » (ou absent de contradiction) en performances entre les sous-ensembles est plus ou moins étudiée (exemple de la QFD) mais la notion « harmonisé entre elles » est souvent confiée aux expériences et à l'intuition des concepteurs. C'est dans cette problématique que nous analyserons la cohérence en performances.

En poursuivant cette définition, nous considérons qu'**un produit serait parfaitement cohérent en performances si à la fin de vie du produit, il a utilisé de toutes les performances de chaque composant de base.**

Un produit est cohérent en performances quand le rapport entre la « Performance exploitée » par le produit et la « Performance disponible » dans chaque composant du produit, est égal à

un :

En comparant avec la notion de l'efficacité en performance [OLF 89],

on peut considérer qu'un produit est cohérent en performance si il utilise efficacement les performances de tous ses composants.

Nous ne pouvons atteindre cet objectif, soit pour des raisons économiques, soit à cause des contradictions techniques :

- Dans un produit, on n'utilise pas obligatoirement toutes les performances de chaque composant. Elles peuvent donc s'appeler les performances « inutiles ». Exemple dans certains cas, on peut utiliser un joint torique comme un amortisseur et donc la performance d'étanchéité n'est pas utilisée.
- Dans un composant de base, les caractéristiques ne sont pas toujours indépendantes. Si dans le produit, l'exploitation de ces caractéristiques ne correspond pas à cette relation de dépendance, alors elles ne seront pas exploitables à 100%.

2.1.4 Cohérence en coût - performance

Un produit cohérent en performance n'est pas forcément un produit économiquement optimal (optimal dans son rapport coût/performance). Par exemple le rasoir électrique. Au lieu de fabriquer la lame qui permet une durée de vie de 5 ans comme tous autres composants du rasoir, on fabrique les lames qui ne dure que 1 ans interchangeable mais beaucoup moins cher.

La cohérence en performance n'est donc pas une finalité, car d'un point de vue industriel la valeur d'un produit est dans son rapport coût/performance, on parlera alors de la « cohérence en coût - performance ». C'est une notion qui prend en compte la mesure du rapport coût/performance et qui nous conduit à la notion de l'efficience.

La « cohérence en coût - performance » d'un produit est atteinte qu'en l'efficience de ses parties sont harmonisé et optimisé.

Selon le niveau de décomposition du produit en composants, on peut dire qu'un produit est cohérent jusqu'à tel ou tel niveau. On peut également utiliser la notion de cohérence pour une performance donnée. Par exemple, selon le critère du couple transmissible, un réducteur est cohérent si tous les composants se détériorent quand le couple à transmettre dépasse le couple transmissible prédéfini. Cela ne signifie pas la cohérence générale du réducteur car les autres performances (comme le rendement ou la durée de vie par exemple) ne sont pas forcément cohérentes.

La cohérence en coût - performance est un critère d'optimisation. Elle permet la meilleure répartition des investissements et des performances locales pour optimiser le rapport coût/performance globale. La cohérence en coût - performance intègre les coûts des composants comme leur **performance économique**. Elle prend en compte le contexte de développement, de fabrication, d'utilisation, de recyclage, etc.

Sur la base d'un champ de connaissances borné, la solution « cohérente en coût - performance » est donc influencée par le contexte de fabrication, d'utilisation, de conception, etc. au moment de la conception du produit. Cette cohérence évolue en même temps que l'évolution des champs de connaissance.

3 Principe de l'Analyse de la Cohérence en Coût - Performance

Chaque performance du produit (performance globale) est le résultat d'une association des propriétés, des caractéristiques des performances locales de plusieurs éléments de base du produit. Dans chaque élément, les caractérisations physiques sont souvent interdépendantes. Les performances globales d'un produit sont, elles aussi, plus ou moins interdépendantes. L'analyse de la cohérence en coût - performances s'appuie sur ces relations complexes pour améliorer la solution, la rendre de plus en plus homogène et optimale.

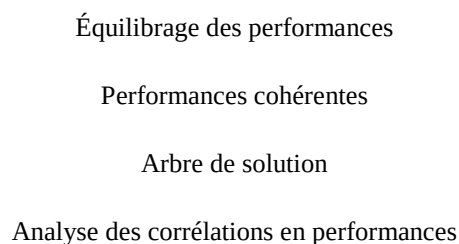
En réduisant au strict nécessaire les performances globale et en équilibrant leurs performance locales de façon cohérente avec leurs coûts, on obtiendra la répartition optimale de l'investissement dans sa structure, par conséquent, le coût global du produit.

L'analyse de la cohérence en coût - performance dans sa propre définition, n'est qu'une évaluation de l'état d'un produit face au critère de cohérence. Avec comme l'objectif d'optimiser le rapport de coût/performance du produit, cette analyse permet de faire apparaître les incohérences si elles existent pour les équilibrer. Le coût de chaque performance et le rapport d'accroissement en coût – performance sont les critères principaux d'équilibrage. Le MES doit satisfaire aux critères d'appréciation de chaque fonction du CdCf. Ces critères d'appréciation sont donc des repères d'équilibrage pour l'ACCP.

Pour anticiper la cohérence en coût - performance dans la première conception, celle de la conception des produits nouveaux, nous nous appuyons sur l'arbre fonctionnelle issue de l'Analyse fonctionnelle, le diagramme FAST. Le suivi des critères d'appréciation associés au besoin consiste à les traduire en critères d'appréciation des fonctions techniques de niveau 1, puis de niveau 2 et ainsi jusqu'au niveau n (propriété propre à l'élément de base). Le cahier des charges fonctionnelles et la spécification des critères d'appréciation sont les données d'entrées de l'ACCP.

La phase descendante de la conception doit viser la cohérence « **approximative** » qui s'appuie sur les coûts et performances estimés. Dans la phase ascendante, après une analyse du coût associé aux performances des composants identifiés dans chaque solution étudiée, on analysera la cohérence en coût – performance et ainsi optimiser et valider la conception du produit. L'ACCP se décompose en deux phases présentés dans la figure 29 ci-dessous :

Fig.29.



ACCP phase ascendante

Arbre fonctionnel

Analyse des corrélations en critères d'appréciation

Équilibrage des critères d'appréciation

Critères d'appréciation cohérents

ACCP phase descendante

Le processus de l'ACCP.

Il existe deux façons de pratiquer l'ACCP: La démarche pragmatique et la démarche de modélisation par un modèle mathématique. Dans un premier temps nous proposons la démarche pragmatique. On peut envisager, à long terme, de formuler des modèles d'optimisation qui visent la cohérence en coût - performance, de développer un logiciel d'analyse de la cohérence en coût - performance basé sur les outils de calcul et de simulation. La démarche pragmatique présentée ci-dessous est adaptée aux petits projets de conception comme c'est souvent le cas des MES.

3.1 Cohérence approximative – phase descendante de l'ACCP

Dans la phase de recherche des solutions, quand l'arbre fonctionnel est en train d'être construit, nous cherchons à approcher à la cohérence en coût – performance. Pour simplifier notre analyse nous nous appuyons sur quelques hypothèses : l'indépendance entre les performances associées au même fonction, l'indépendance entre les fonctions du même niveaux.

La cohérence approximative permet au concepteur d'être sensibilisé aux difficultés technologiques du projet. C'est une approche macro qui sert de base à une future analyse plus fine.

Fig.30.

F

F_1

F_3

F_2

Fonctions de niveau inférieur

Fonction de niveau supérieur

Solution 1

Solution 2

Extrait de l'arbre fonctionnel

Phase de recherche des solution selon le diagramme FAST

Prenons deux niveaux consécutifs de l'arbre fonctionnel (Fig.30). La solution 1 propose d'utiliser deux fonctions techniques F_1 et F_2 pour réaliser la fonction F demandée.

3.1.1 Analyse des corrélations entre les critères d'appréciation

Elle consiste à définir tous les liens entre les Critères d'appréciation de la fonction mère et ceux des fonctions filles (Fig. 31). On identifie auparavant les critères d'appréciation associées aux fonctions. La fonction doit être caractérisée par un **minimum** de critères d'appréciation (nécessaire et suffisant) que l'on **considère comme indépendants**.

Fig.31.

P_{11}

P_{12}

P_{13}

P_{21}

P_{22}

C_1

C_2

C_3

F

F₁

F₂

Les corrélations entre les critères d'appréciation de la fonction mère et des fonctions filles.

Les corrélations qui lient deux niveaux consécutifs de l'arbre fonctionnel sont très complexes. Dans la pratique, on peut distinguer deux types de relation :

- Nous appelons les relations rigides, celles dont le critère d'appréciation de la fonction fille est définie parfaitement par les Critères de la fonction mère.

$$P_{xy} = f_{xy}(C_m)$$

- Nous appelons les relations souples, toutes celles dont le critère de la fonction fille ne dépend pas exclusivement des Critères du niveau supérieur mais est influencée par d'autres critères de même niveau.

$$P_{xy} = f_{xy}(C_m ; P_{ij})$$

Cette distinction permet de classer par ordre de priorité les relations entre les critères. On s'intéresse surtout aux relations souples car elles relèvent d'un exercice multi variables dans lequel le mécanisme de l'équilibrage (étape 2) joue son rôle d'optimisation. Les critères d'ordre global comme « durée de vie », « rendement », etc. doivent être intégrés dans le diagramme et traités de la même façon que les critères d'appréciation des fonctions.

3.1.2 Équilibrage des critères d'appréciation

Elle permet de trouver le meilleur compromis entre les critères d'appréciation des fonctions filles pour satisfaire les Critères d'appréciation de la fonction mère.

Estimation du coût.

Pour simplifier l'estimation du coût, on considère que la courbe de coût – performance est identifier par trois valeur :

Coût

Performance

P*

Solution X

valeur optimale de la performance : Dans la plage de variation des niveaux de performance probables de la solution étudiée, la valeur de performance optimale est définie comme celle dont le rapport coût/performance est minimum (Fig. 32).

Fig.32. La valeur optimale de la Performance

Les valeurs maxi et mini de performances : elles limitent la plage de performance que la solution permet d'atteindre. Avec l'hypothèse que l'apport entre l'accroissement du Coût et l'accroissement de la Performance ($\Delta C/\Delta P$) est relativement stable aux alentours de la valeur de la performance optimale, nous pouvons tracer la courbe coût – performance comme représenté Fig.33.

Fig.33.

Coût

Performance

P^*

Le courbe coût – performance estimé.

Les trois valeurs de la performance sont estimés par le concepteur, et la précision est basée sur son expérience, sur l'état d'avancement du projet et sur les informations génériques relatives à la solution étudiée [YANNOU 00]. On note que chaque performance élémentaire est une contribution à la satisfaction du critère d'appréciation étudié. Les performances peuvent être de nature différente et avoir des influences plus ou moins fortes. Pour permettre la comparaison de leur rapport d'accroissement, il faut les ramener à une unité de mesure commune. Cette mesure commune représente l'impact de l'accroissement de la performance de la fonction fille sur la performance de la fonction mère.

Equilibrage.

Les relations rigides doivent être traitées en priorité. Le critère d'appréciation du niveau inférieur est directement calculé à partir des Critères d'appréciation du niveau supérieur dont il dépend. Sa valeur doit être ajustée en fonction du critère le plus exigeant. Si les exigences sont contradictoires, on peut soit négocier les critères de niveau supérieur, soit faire évoluer la solution.

Pour les relations souples, on cherche à établir un équilibre entre les critères selon le mécanisme de l'équilibrage suivant.

- Avant d'équilibrer les performances élémentaires, il faut initialiser la solution en utilisant la valeur optimale de chaque performance des fonctions filles.
- Si les valeurs optimales sont insuffisantes pour répondre au critère d'appréciation de la fonction mère, on augmente la performance de la fonction fille dont le rapport d'accroissement Coût/Performance semble le plus faible (Fig.34 sens de ΔP).

Fig.34.

Coût

Performance

P_{11}

P^*_{11}

ΔP

P_{21}

P^*_{21}

ΔP

Coût

Performance

$-\Delta P$

$-\Delta P$

Equilibrage les performances élémentaires

P_{11} et P_{21} dans la relation avec C_1

- Si la valeur optimale est surabondante pour répondre au critère d'appréciation les ajustements sont dans le sens inverse (Fig. 34 sens de $-\Delta P$)

Ainsi, on fait basculer l'équilibre vers un optimum global Coût/Performance en réduisant la performance de la fonction fille où la décroissance est la plus forte (graphe coût/performance) et en augmentant la performance de celle dont la croissance est la plus faible. Dans ce cas là, pour atteindre la même performance globale qui répond au critère d'appréciation, on optimise le coût global.

Pour une performance donnée, chaque sous solution induit une plage économiquement optimale de performances (Fig.35). Ainsi, les ajustements peuvent faire basculer d'une sous solution à une autre.

Fig.35.

Coût

Performance P_1

P_b

Sous solution 1

Sous solution 2

Le basculement d'une sous solution à une autre.

A chaque niveau, les critères d'appréciation de la fonction mère deviennent l'objectif de l'équilibrage pour les fonctions filles associées. L'analyse permet de suivre les fonctions du diagramme des racines jusqu'aux feuilles qui sont matérialisées par les éléments de base du produit. Globalement, les critères d'appréciation sont atteints au moindre coût.

3.2 Cohérence affinée – phase ascendante de l'ACCP

La démarche peut être utilisée pour la validation des solutions retenues ou pour la reconception des produits existants, en étant éventuellement intégrée à l'analyse fonctionnelle interne. Selon l'objectif recherché, la *cohérence affinée* permet d'améliorer la cohérence en coût – performance en intégrant les données concrètes de la solution étudiée, soit en optimisant le coût et en gardant les performances globales du produit, soit en augmentant au maximum les performances, de façon cohérente, pour un budget donné (CCO).

Après une phase d'analyse des coûts des composants du produit, on déterminera le coût affecté à chaque performance et le rapport d'accroissement associé. Puis, on les intègre dans l'arborescence du diagramme FAST. Ici, puisqu'il s'agit d'une validation, l'ACCP s'appuie sur l'arbre de solutions et se déroule de la droite vers la gauche dans l'arborescence, du niveau éléments de base au niveau produit entier.

Dans cette étape de la démarche, le choix des composants de base permet d'identifier l'éventuelle interdépendance de leurs performances. Ces interdépendances impliquent des modifications dans l'arborescence FAST. Avant de démarrer le mécanisme de l'équilibrage, il est nécessaire de refaire l'analyse de leurs relations.

- Pour les relations rigides, on valide les Performances par rapport aux Critères en garantissant qu'elles seront suffisantes pour répondre aux exigences de toutes leurs relations.
- Dans les relations souples, les rapports coût/performance sont connus et permettent le re-équilibrage en prenant en compte les corrélations supplémentaires.

Une performance peut participer à une relation rigide et en même temps à une relation souple. Dans ce cas, la relation rigide est traitée comme une contrainte dans le re-équilibrage de cette performance.

4 Remarque.

Différant de « La Valeur », qui est un critère de choix des solutions, « La cohérence en coût – performance » est un critère d'amélioration de la solution étudiée. On peut l'associer à la méthode Analyse de la Valeur pour obtenir le « juste nécessaire » dans « un meilleur compromis de performances locales ».

La démarche pragmatique est relativement simple et pertinente, mais son application est rapidement complexe pour des produits où les interférences sont nombreuses, où la démarche par les modèles mathématiques est plus avantageuse. En plus, cette démarche ouvre la voie d'une intégration plus large des outils métier et des critères multidisciplinaires.

Modèle mathématique d'optimisation visant la cohérence en coût - performance.

Grâce à des outils de calculs et de simulations très développés, ce modèle d'optimisation peut être envisageable si toutes les relations entre les Critère d'appréciation, les interdépendances des Performances des composants et les rapport d'accroissement coût/performance peuvent être modélisées sous forme de données mathématiques ou numériques (les formules, les graphes, les tableaux, ...).

L'une des difficultés consiste à ramener les performances élémentaires et le critère qu'elles satisfont à des unités de mesure comparable. On trouve ici l'intérêt d'utiliser la méthode des plans d'expériences pour pouvoir identifier l'interdépendance entre P_{xy} , C_m et les autres P_{ij} .

Le modèle d'optimisation qui vise la cohérence technico-économique est constitué par :

- Une fonction d'optimisation. C'est une fonction de calcul du coût global du produit
- Les fonctions de contraintes ou aux limites. Ce sont toutes les fonctions de liaisons, d'interdépendances, de rapports coût/performances ci-dessus.

Dans ce modèle, les variables sont les Performances ou Critères, les caractéristiques, les coûts élémentaires. Une fois le modèle d'optimisation résolu, nous obtiendront l'estimation du coût global et les paramètres en performances de la solution optimale.

Perspectives de l'ACCP

L'analyse de la cohérence en coût – performance (ACCP) peut être utilisée aussi bien pour la préconception, la conception détaillée, que pour les procédés de fabrication.

Cette analyse peut être appliquée même pour la phase de définition du cahier des charges. Dans ce cas, la satisfaction du client est la fonction globale et les fonctions du cahier des charges sont les fonctions locales. Les performances de la fonction globale sont la satisfaction du client, les performances des fonctions locales sont les critères de satisfaction. La mise en équation des relations entre ces performances permet de déterminer l'impact de chaque critère d'appréciation au niveau final de l'arborescence fonctionnelle sur la satisfaction générale du client. L'ACCP dans ce cas permet d'élaborer un cahier des charges fonctionnel cohérent au niveau de ses critères d'appréciation.

Elle est particulièrement adaptée aux produits qui ne peuvent pas bénéficier d'un retour d'expérience. Les produits unitaires ou de petites séries, les machines spéciales, les équipements d'expérimentation font partie de cette famille. Elle est d'autant plus pertinente que le niveau technologique est élevé.

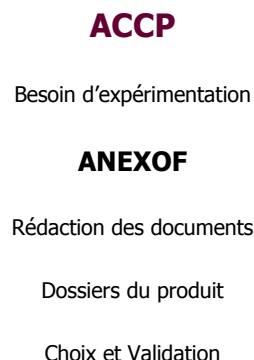
chapitre 6

Démarche de la conception des Moyens d'expérimentation – premier modèle

1 Structure de la démarche

D'une façon générale, le processus de conception des produits nouveaux se décompose en 4 phases (§2 du chapitre 4) : caractérisation pluridisciplinaire du besoin, recherche de solution, définition préliminaire du produit et définition détaillée du produit.

Fig.36.



CdCff

MES

Expérimentations

Recherche des solutions

Principe de la solution

Conception préliminaire

Validation des composants

Validation du concept

Définition préliminaire

Définition détaillée

Validation et étalonnage

Fabrication

Problème de conception

Démarche de conception des Moyens d'Expérimentation Spécifique.

Dans notre démarche (fig.36), la 1^{ère} phase s'appuie sur l'ANEXOF qui permet une définition du cahier des charges précise, complet et compréhensible.

Dans les phases de recherche de solutions, de définition préliminaire et de définition détaillée du MES, nous mettons en place l'Analyse de la cohérence en coût – performance (ACCP) qui a pour but d'optimiser le MES dès la première conception.

La validation à chaque étape consiste à justifier l'avancement de la conception par rapport aux exigences du CdCf, à évaluer le délai et le budget nécessaire, etc. Elle permet d'éviter des éventuelles inadéquations qui sont la cause des re-conceptions successives et aide à prendre les décisions et à planifier les activités et leurs budgets.

Après la définition détaillée du MES, la rédaction des documents consiste d'une part à préciser les plans des pièces à fabriquer, les composants choisis, leurs exigences techniques, l'assemblage, etc. et d'autre part les protocoles d'étalonnage, les protocoles d'essais, le guide d'utilisation avec ses performances et ses limites. Enfin, la phase de fabrication et la validation du MES.

2 Pilotage du projet

Créer un groupe de travail

Les membres sélectionnés sont compétents sur le sujet et concernés par les objectifs de l'étude. L'équipe comprend : le décideur, les chercheurs, les expérimentateurs et les concepteurs. Chaque membre de l'équipe peut jouer plusieurs rôles selon ses compétences, le contexte du laboratoire et le délai du projet. Nous considérons que la notion pluridisciplinaire ne nécessite pas forcément un nombre important de participants.

La notion pluridisciplinaire dans notre cas est caractérisée par la composition du groupe de travail dont les deux acteurs principaux sont le chercheur et le concepteur. Dans cette étude, le chercheur joue le rôle du demandeur et aussi de l'acteur actif dans le développement du MES. La participation des services opérationnels comme les sous-traitants, l'atelier, les fabricants ou les fournisseurs est très importante dans la mesure où ils apportent les informations nécessaires à l'ACCP. La communication et le travail en équipe sont les conditions de la réussite.

Planning de travail.

Nous exposons la démarche de développement en 6 phases et proposons ci-dessous une liste des outils méthodologiques associés (non exhaustive) (tableau 5).

N°	Phases	Acteurs	Outils associés
1	Analyse du besoin	L'ensemble de l'équipe	ANEXOF, AF, GRAFCET
2	Recherche des solutions	Concepteur	FAST, ACCP,
	Validation et choix des	Concepteur	ACCP, QFD,

	solutions	Chercheur	
3	Définition préliminaire	Concepteur Services opérationnels	Veille technologie, ACCP, Outils de calculs,
	Validation du concept	Concepteur Chercheur	AV, ACCP
4	Définition détaillée	Concepteur Services opérationnels	ACCP, outils de calculs,
	Validation des composants	Chercheur Concepteur Services opérationnels	AV, ACCP,
5	Rédaction des documents	Chercheur Concepteur	
6	Fabrication	Services opérationnels	
	Teste et étalonnage	Chercheur Concepteur	

Tableau 5. Démarche de développement des MES et les outils associés.

Le développement de MES s'inscrit dans le projet expérimental du laboratoire. Donc dans la gestion de projet, il est essentiel de le positionner par rapport au planning de la recherche expérimentale. Le tableau 6 ci-dessous présente l'enchaînement des deux programmes : expérimentation et développement du MES.

Démarche expérimentale	Démarche de développement des MES
ANEXOF	
<i>Formalisation du problème</i>	
<i>Définition du modèle expérimental</i>	
Construction des plans d'expériences	Elaboration du CdCf
	ACCP
	Recherche des solutions
	Définition préliminaire
	Définition détaillée
<i>Rédaction des documents</i>	
	Fabrication
<i>Teste et étalonnage</i>	

Réalisation des essais
Analyse et interprétation
Exploitation

Tableau 6. Programmes de l'Expérimentation et du développement des MES

Inspiré de l'approche simultanée et intégrée dans la conception des MES, cette gestion permet aux chercheurs et aux concepteurs de travailler dans une collaboration plus efficace.

Prendre en compte le contexte du laboratoire.

Pour les projets, dont les contraintes de budget et de délai sont évolutifs (budget annuel et délais provisoires), nous devons, à chaque période, assurer d'une part l'avancement progressif du programme de recherche, et d'autre part la pérennité de l'investissement

Afin d'avoir une vision globale, il est indispensable de construire dès le début un planning général du programme de recherche et de faire une Analyse de l'Expérimentation pour l'ensemble du projet. Ensuite il faut le diviser en plusieurs petits projets, en les positionnant par rapport aux états d'avancement de la recherche. On peut décomposer encore plus finement en justifiant le choix des paramètres d'entrée dans l'ordre de leur niveau d'influence sans oublier de mettre les autres paramètres en facteurs perturbateurs.

Pour optimiser les investissements, il faut associer les investissements à long terme avec les investissements à court terme. Cette objectif ne peut être atteint si la phase d'analyse de l'expérimentation ne fait pas la distinction entre les paramètres indispensables (les paramètres déclenchant du phénomène et les paramètres de contrôle), les paramètres influents, les paramètres perturbateurs, etc. Tous les moyens utilisés pour faire varier les paramètres indispensables à l'expérimentation seront exploités tout au long du programme de recherche. Il est donc important de prévoir leur fonctionnement à long terme afin de mieux exploiter les investissements qui leurs sont dédiés. Pour les paramètres spécifiques de chaque sous projet, il est important que leurs fonctions (manipulations) soient les plus indépendantes possibles et éventuellement réutilisables.

3 Conclusion

Notre démarche apporte deux outils nouveaux à la conception des MES : l'analyse de l'expérimentation orienté fonctionnelle (ANEXOF) et l'analyse de la cohérence en coût – performance (ACCP). Ces deux outils nous aident à répondre à la problématique de notre recherche.

Les niveaux de complexité des projets de développement des MES sont directement liés à l'expérimentation à réaliser. Pour s'adapter au niveau complication des MES, notre démarche est flexible dans sa structure. Nous pouvons suivre la démarche en utilisant un ou les deux outils : l'ANEXOF et l'ACCP. A l'intérieur même de chaque outil, nous pouvons approfondir notre analyse avec le niveau détaillé que nous souhaitons.

Les expérimentations présentées dans la troisième partie ci-dessus valideront nos hypothèses.

Expérimentation de la démarche

Introduction – Deux séries d’expérimentation

Dans cette partie, nous expérimentons notre démarche dans plusieurs projets de développement des MES. Afin de valider nos hypothèses, nous décidons de pratiquer deux protocoles expérimentaux différents. Un de nos objectifs est celui d’une adaptation au contexte de développement particulier de chaque MES. C’est la raison pour laquelle nous recensons une dizaine de projets et les classons, selon leur contexte, en deux séries pour suivre les deux protocoles.

Le premier protocole consiste à utiliser un par un nos deux outils : ANEXOF et ACCP. Il permet de valider les deux sous – hypothèses. Pour valider l’ANEXOF, nous choisissons les projets pour lesquels l’équipe de concepteurs n’avait aucune expérience préalable sur le phénomène à étudier. Et dans le cas de l’ACCP, nous choisissons des projets de conception qui nécessite d’optimiser le rapport coût – performance du MES afin de respecter le budget et d’atteindre le but du projet de recherche.

Le second protocole consiste à appliquer notre démarche de A à Z. Il permet de valider l’hypothèse générale. C’est grâce à la réussite de la première série d’expérimentations que nous gagnons la confiance des chercheurs. Ils nous confient ensuite leurs projets de développement des MES dès la phase de formalisation du problème d’expérimentation jusqu’à la fabrication des moyens dédiés. Cette série de projets nous a permis d’appliquer notre démarche dans des domaines variés et dans des contextes plus ou moins complexes.

Les retours d’expériences de ces séries d’expérimentation nous permettent de valider et de proposer certaines améliorations nécessaires. Un deuxième modèle de la démarche sera proposé afin de prendre en compte ces améliorations.

chapitre 7

Première série d’expérimentation

1 Introduction – Objectif

Selon les contextes particuliers des projets, la méthode ne s’applique pas d’une façon complète. Le caractère indépendant de chaque outil dans la démarche permet de les utiliser comme des outils méthodologiques autonomes et flexibles.

Les projets «banc d’essais de ressort radial » ou « banc d’essai du grenailage par CO₂ » ou « Caractérisation dynamique et optimisation du procédé de collage hors plan des structures composites » sont des projets où le phénomène est très peu connu. L’importance de l’ANEXOF dans la conception des MES associés y est incontestable. Par contre, la phase de définition du concept est assez simple, elle ne justifie pas une ACCP poussée.

En revanche, dans les projets comme « Maîtrise et asservissement du chariot » ou « reconception d'une mini machine de traction » pour lesquelles la phase d'analyse du phénomène est déjà faite, la stratégie est réduite à l'optimisation des phases de définition du concept et de définition détaillée. L'ACCP est ici tout à fait adaptée.

Les premières expérimentations que nous présenterons ci-dessous permettent de valider de façon indépendante, les deux outils méthodologiques proposés : l'ANEXOF et l'ACCP. Elles servent à valider les deux sous hypothèses que nous avons proposé dans la deuxième partie.

2 Validation de l'ANEXOF

Nous avons expérimenté cet outil sur trois projets de développement des MES :

11. 1. banc d'essais de ressort radial
12. 2. banc d'essai de grenaillage par CO2
13. 3. machine d'essais pour la caractérisation dynamique et l'optimisation du procédé de collage hors plan des structures composites

Ces trois projets consistent à étudier des systèmes différents. Ils recouvrent une diversité de domaines d'application, de types de MES développés, de catégories d'expérimentation, de protocoles expérimentaux (tableau 7)

Projet	système	catégorie expérimentale	Protocole expérimental	type de MES	Domaine d'application
banc d'essais de ressort radial « stent »	produit nouveau	Validation	protocole spécifique	Banc d'essais	Biomécanique
banc d'essai du grenaillage par CO2	procédé nouveau	Optimisation	protocole spécifique	Banc d'essais	Procédé de fabrication
machine d'essais pour la caractérisation dynamique et d'optimisation du procédé de collage hors plan des structures composites	nouvelle matière	Caractérisation	Protocole modifié	Machine d'essais mixte	Physique des matériaux

Tableau 7. Récapitulation des projets de validation d'ANEXOF.

Dans le cadre de ce rapport, nous présenterons plus en détail le projet « Caractérisation dynamique et optimisation du procédé de collage hors plan des structures composites ». C'est un cas complexe. Dans la catégorie des expérimentations de « caractérisation », ce projet présente de nombreuses inconnues. Basé sur un protocole d'essais standard (ARCAN) modifié et dans le but de développer un MES de type mixte, ce projet est un exemple représentatif des difficultés et des contextes particuliers du développement des MES.

2.1 Projet de caractérisation dynamique et d'optimisation du procédé de Collage hors plan des structures composite.

Le projet a débuté en janvier 2002. La phase de l'Analyse d'EXpérimentation Orientée Fonctionnelle a duré 2 semaines en deux périodes séparées par trois réunions.

La première réunion consiste à formaliser la problématique et à créer le groupe de travail. Selon le rôle de chacun, la semaine suivante permet au groupe de collecter, d'enrichir et d'échanger leurs connaissances sur le sujet.

La deuxième réunion permet au groupe d'aborder la phase d'analyse de l'expérimentation et de construire le modèle expérimental et de formaliser la première version du cahier des charges. Les points d'interrogation et les informations manquantes sont complétées grâce aux travaux de la deuxième semaine.

Enfin, la troisième réunion permet au groupe de finaliser l'analyse et de déterminer le cahier des charges en prenant en compte le budget dédié.

Ci-dessous nous présentons le déroulement de ce travail.

2.1.1 Formalisation du problème

Identification du besoin en expérimentation

De nombreuses équipes de recherche travaillent au développement de méthodes de prévision du comportement et de l'endommagement des structures composites. Cependant, il reste beaucoup à faire pour satisfaire les concepteurs. Certains outils de modélisation et de calcul de dimensionnement des structures à géométrie simple sont maintenant bien évolués. Par contre, pour l'étude des assemblages les ingénieurs ont toujours recours aux méthodes empiriques qui sont longues et coûteuses.

La DGA (Direction Générale de l'Armement) et le laboratoire LM3 de l'ENSAM montent une unité de recherche pour développer des outils de dimensionnement des assemblages de composites collés qui s'appuient sur les outils d'analyse par éléments finis.

Les colles et les matériaux composites ont des comportements mécaniques connus lorsqu'ils sont testés séparément. Mais le problème des assemblages collés vient de la dégradation locale des matériaux à l'interface colle - composite. Leurs comportements sont alors différents.

La structure microscopique à l'interface colle – composite est très complexe. Il est hétérogène, anisotrope, et son comportement n'est pas entièrement connu à ce jour. Afin d'identifier le modèle de simulation adéquat, une recherche expérimentale est donc nécessaire. Le problème à résoudre est :

Quel est la loi de comportement en mécanique des interfaces colle – composite dans une structure composite collée ?

Définition du but de l'étude et des objectifs à atteindre

L'étude porte sur des raidisseurs qui prennent place sur les pont des navires militaires. Ces raidisseurs peuvent être fortement sollicités en cas de houle par exemple. Les sollicitations ne

sont pas des chargements statiques, c'est pourquoi une **étude dynamique du comportement de l'assemblage** est nécessaire, afin de simuler les chocs lors des cas réels.

Le phénomène de l'endommagement de la structure composite est déjà étudié dans différents travaux de recherches [ARCAN 78], [ARCAN 87], [GINESTE 93], [HUNG 97], [HUNG 99], [WALKRICK 99], [ROZICKI 00], [DORMEGNIE 01]. Les études sur le comportement en mécanique des structures assemblés sont aussi nombreuses [FISCHER 89], [ADAMS 97], [NEON 98], [TONG 99], [PENADO 00], [CHEIKH 01]. Nous avons donc certaines connaissances sur le phénomène qui permettent de modéliser le système en sollicitation statique. Le but de cette étude est d'améliorer ce modèle dans le cas dynamique. L'expérimentation doit permettre d'identifier les nécessaires améliorations du modèle de calcul puis de le valider. Elle se place dans la catégorie des expérimentations de caractérisation. Donc les essais sont quantitatifs et les erreurs admissibles sont limitées.

Définir les limites et les contraintes de l'étude

Ce projet consiste en l'étude d'un assemblage collé d'éléments stratifiés. Compte tenu de la structure très complexe de l'assemblage, il est obligatoire d'étudier **les comportements macroscopiques** de la totalité de l'assemblage.

Définir les objectifs.

Les chercheurs ont besoin d'identifier les évolutions des contraintes et des déformations dans la zone collée. Les objectifs principaux sont les suivants :

- Loi de comportement mécanique de la zone collée par différents types de colle.
- Evolution de cette loi selon la vitesse de déformation.
- Influence des paramètres dimensionnels de la structure collée sur le comportement dynamique.
- Corrélation entre les résultats de calculs par « éléments finis » et les résultats expérimentaux afin de valider le modèle de simulation.

Quantifier les objectifs

Pour identifier cette loi de comportement, les chercheurs proposent de la caractériser par des critères relatifs à des états de contraintes macroscopiques.

La loi de comportement comprend des courbes de limite d'élasticité et de limite de rupture exprimant les contraintes en traction en fonction des contraintes de cisaillement.

Fig.37.

Zone élastique de l'assemblage

Zone de non linéarité

Zone de rupture

Contrainte de traction

Contrainte de cisaillement

Critère d'assemblage collé.

Dans le cadre des essais dynamiques, nous ne nous sommes pas intéressés par la limite d'élasticité.

La corrélation des résultats consiste à comparer d'une part les valeurs macroscopiques des contraintes critiques et d'autre part les déformations microscopiques du maillage.

Classer les objectifs dans l'ordre prioritaire

Les objectifs cités ci-dessus sont tous très importants pour permettre aux chercheurs d'atteindre le but de la recherche. Mais dans un premier temps, les lois de comportement et l'influence de la vitesse sur ces lois sont prioritaires

Définition des moyens nécessaires

Définir le besoin en moyens d'essais, le budget et le délai de réalisation.

Les essais statiques pour étudier les structures collées sont mis en place à partir des essais ARCAN (Fig. 38), qui permettent d'appliquer et de contrôler les chargements transverses.

Fig.38.
Montage Arcan

Deux secteurs angulaires sont liés à deux embases métalliques sur lesquelles sont collées les faces inférieure et supérieure de l'éprouvette. Deux secteurs définissent le plan de chargement et possèdent plusieurs points de liaison avec les mors d'une machine de traction. Ces points diamétralement opposés permettent d'obtenir trois combinaisons de sollicitations : de traction perpendiculaire, de cisaillement transversal à 45° et de cisaillement pur.

Mais dans le cadre des sollicitations dynamiques, ce montage ne convient pas tout à fait [VINCENT 2002]. A partir de ce montage (Fig. 38), L'équipe projet voudrait améliorer ce montage en vue de l'exploiter pour des essais dynamiques.

Le MES qu'on veut développer appartient à la famille des MES mixtes. Il comprend la machine de traction à grande vitesse (Fig. 39) et un montage ARCAN adapté aux essais dynamiques.

Fig.39.

Groupe hydraulique

Module de traction

Module d'acquisition

Module de traitement

Machine de traction à grande vitesse.

La machine de traction à grande vitesse (MTGV) présentée Fig.39 est contrôlée en déplacement en utilisant un vérin hydraulique. Elle se compose de 4 éléments : Groupe hydraulique, module de traction, module d'acquisition et module de traitement.

Le module de traction comporte deux mors associé à un système de guidage. Le mors supérieur est fixe, le mors inférieur est mobile. La vitesse de déplacement du mors inférieur qui est assurée par le groupe hydraulique, peut atteindre 20 m/s .

Le module d'acquisition permet de récupérer 4 données : le déplacement du vérin, l'effort mesuré sur le mors supérieur, le temps écoulé et le déplacement entre 2 sections de l'éprouvette. Ce déplacement est assuré par un système de mesure optique (dispositif Zimmer). Ces données sont récupérées sur un fichier informatique sous forme de listes de points, et sont ensuite traitées sous Excel.

Le montage qu'on veut développer doit s'adapter à cette machine. Le délais prévu pour le développement est d'environ 6 mois. Le budget prévisionnel est de 5000€

Définition de l'interface entre le système à étudier et son milieu extérieur

Identifier le système à étudier

Avec l'objectif d'étudier les comportements mécaniques des interfaces « colle – composite » des structures collées. Le système à étudier est l'éprouvette définie par le protocole d'essais ARCAN (Fig. 40).

Fig.40.

4 mm

0,2 mm à 1 mm

4 mm

25 mm

20 mm

Dimension de l'éprouvette.

2.1.2 Définition du modèle expérimental

- La vitesse (V) de déplacement relatif entre les deux parties de l'éprouvette. Pour

Les paramètres du système à étudier (éprouvette), dont nous étudions l'influence sur les résultats d'essai, sont les suivants :

- Le matériau composite utilisé est un composite Verre - Résine (VR) fabriqué par voie humide.
- Les types de colle : Une colle rigide, à comportement globalement fragile, que nous nommerons colle R et une colle élastique, à comportement non linéaire, que nous nommerons colle E.
- L'épaisseur de colle (d) va de 0,3 à 2mm

Le flux de sortie.

L'objectif de cette étude est d'identifier la loi de comportement en dynamique des structures collées. C'est à dire :

- La limite de rupture.
- L'allongement de l'éprouvette à la rupture

Pour le deuxième but qui consiste à valider le modèle « éléments finis » choisi, nous avons besoin entre autre du paramètre :

- Le champ de déformation locale de la colle pour le corrélérer avec le maillage du modèle EF

Modèle de la « boîte noire ». Nous pouvons ici déterminer les éléments principaux de la boîte noire (Fig. 43) :

Fig.43.

Limite de rupture

Allongement de l'éprouvette

Champs de déformation

Vitesse de déplacement V

Angle de la sollicitation α

Matière composite VR

Type de colle R ou E

Epaisseur de la colle d

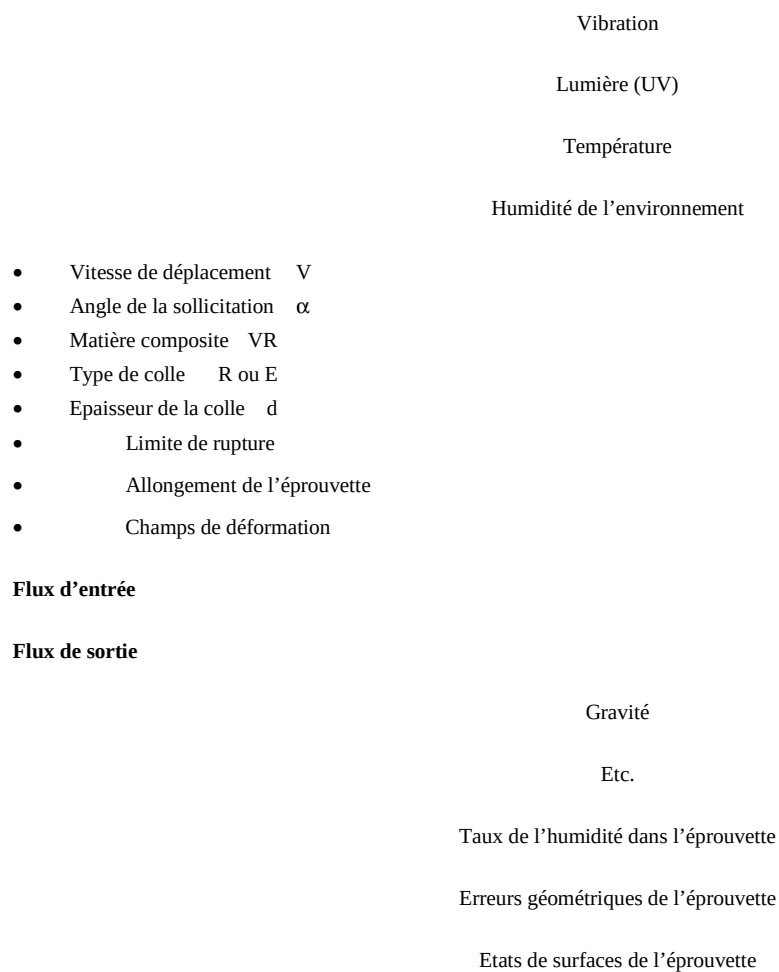
La boîte noire de l'expérimentation.

Ce modèle est représentatif du modèle expérimental théorique souhaité par le chercheur.

identification des facteurs perturbateurs

On trouve des facteurs perturbateurs dans le milieu extérieur du système et dans le système lui même.

Fig.44.



Modèle expérimental réel.

Les éléments du milieu extérieur qui entrent en contact avec le système à étudier (éprouvette) sont nombreux (Fig 44). Mais la plupart d'entre eux n'influencent que très faiblement son comportement (Ex. gravité) d'autres l'influence dans le temps par le vieillissement (Ex. température, humidité, UV, ...). Ceux qui sont susceptibles d'influencer le phénomène de rupture dynamique (très rapide) sont peu nombreux. La plus importante est la vibration à haute fréquence (un choc par exemple). Elle favorise la propagation des fissures internes et fausse les résultats d'essais.

Les éprouvettes subissent des procédés de fabrications leur permettant d'avoir des caractéristiques données. Mis à part les paramètres principaux ci-dessus (matière composite, colle E ou R, épaisseur d), il y a des paramètres qui peuvent éventuellement influencer le résultat d'essai comme :

- • Le taux d'humidité dans l'éprouvette
- • Les erreurs géométriques des éprouvettes
- • L'état de surface des éprouvettes après usinage
- • Etc.

Les paramètres ne sont pas tous en interaction avec le moyen d'expérimentation. Nous ne retenons que ceux qui peuvent rentrer en contact avec le MES. Ici, nous identifions les paramètres d'erreur géométrique et dimensionnelle des éprouvettes et leur état de surface. Ils représentent les défauts des interfaces entre le système à étudier et le MES.

Construction du modèle expérimental

L'expérimentation que nous cherchons à réaliser, rassemble des essais qui ont pour objectif d'étudier le phénomène dynamique de la rupture type ARCAN des structures en composite collé.

Le système à étudier est un ensemble de deux parties en composite qui s'assemblent par une couche de colle formant l'éprouvette présentée dans la Fig. 40.

Le phénomène dynamique est déclenché par une sollicitation à grande vitesse, en traction ou en cisaillement ou en associant les deux. Cela afin de créer un champs de contraintes planes dans la zone de collage de l'éprouvette, croissant jusqu'à la rupture de celle-ci. Les efforts de sollicitation et d'allongement de l'éprouvette à la rupture permettent d'identifier la loi de comportement dynamique. L'observation du champs de déformation pendant l'essai permet de valider le modèle de calcul.

Les paramètres d'entrée à faire varier ou à figer et les paramètres perturbateurs à maîtriser sont identifiés ci-dessus (Fig 44). Dans le cas de sollicitation dynamiques, les essais sont non interrompus et nous ne pouvons mesurer que la limite à la rupture.

Le principe de l'essai ARCAN consiste à provoquer un état de contrainte plane sur l'éprouvette [ARCAN 78] précisément sur la zone de collage. Mais la matière de l'éprouvette (composite orthotrope) possède trois plans de symétrie. Pour éviter l'effet de déformation asymétrique qui perturbe le champs de contrainte plane dans la zone de collage, il est important que le plan de sollicitation soit confondu avec l'un des plans de symétrie de l'éprouvette. C'est la condition de validation pour la sollicitation ARCAN.

L'inertie est un effet important dans les phénomènes dynamiques. Quand la sollicitation est asymétrique (c'est le cas de la machine de traction à grande vitesse Fig 39) elle peut créer un onde de propagation de contrainte dont le champs de contrainte sera asymétrique pendant l'essai. En tenant compte de la masse très faible des éprouvettes, nous ignorons l'effet de l'inertie due à la sollicitation asymétrique, hypothèse qu'il faudra valider ultérieurement.

2.1.3 Elaboration du cahier des charges fonctionnelle

Identification des fonctions principales

Maintenant nous pouvons placer le MES entre le système à étudier et son environnement (Fig. 45) :

Fig.45.

MES

Vibration

- Vitesse de déplacement V
- Angle de la sollicitation α
- Matière composite VR
- Type de colle R ou E
- Epaisseur de la colle d
- Limite de rupture
- Allongement de l'éprouvette
- Champs de déformation

Flux d'entrée

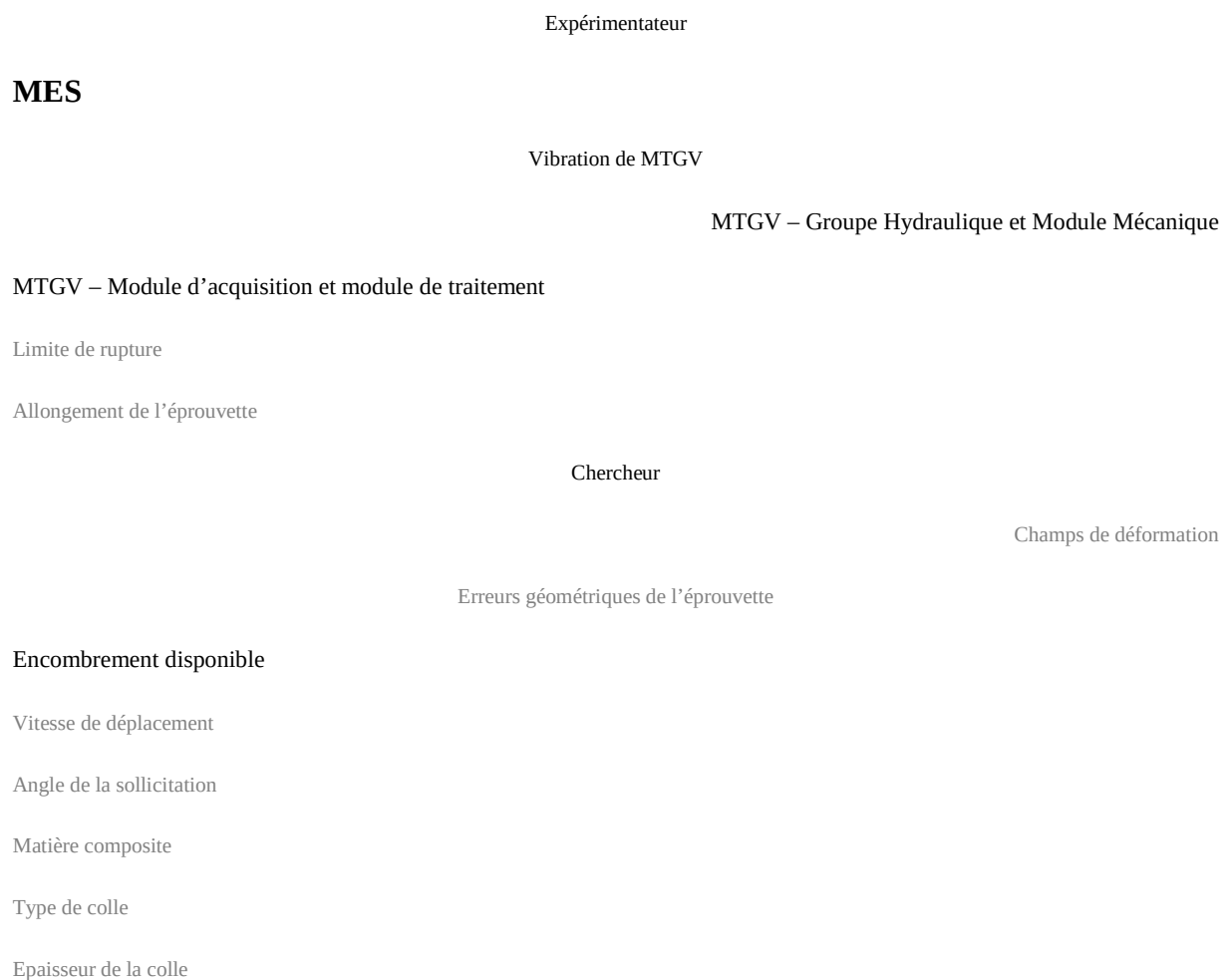
Flux de sortie

Erreurs géométriques de l'éprouvette

Positionnement de MES dans le modèle expérimental

Le MES doit créer le flux d'entrée, récupérer le flux de sortie et éviter les facteurs perturbateurs. Comme il est précisé ci-dessus, le MES mixte a deux parties : la Machine de Traction à Grand Vitesse (MTGV) et la partie que nous devons développer. Cette dernière doit faire le pont entre le système à étudier (éprouvette) et cette machine. Compte tenu des fonctionnalités de la MTGV, le graphe des fonctions de cette partie selon la méthode APTE (la pieuvre) est présentée dans le Fig. 46 :

Fig.46.



La pieuvre de MES

Pour créer la sollicitation dynamique, nous nous appuyons sur les capacités de la MTGV. Le MES doit transmettre ce mouvement dynamique à l'éprouvette en assurant les paramètres de vitesse et d'angle de la sollicitation.

Afin de tester différents types de colle et d'épaisseur de colle, le MES doit permettre aux expérimentateurs de changer l'éprouvette dont l'épaisseur est variable sans modifier le modèle de la sollicitation (en assurant une sollicitation en contrainte plane selon le principe ARCAN).

Pour récupérer les résultats d'essais, le MES doit transmettre fidèlement l'effort de sollicitation jusqu'au capteur de force de la MTGV et permettre l'installation du dispositif Zimmer pour mesurer le déplacement et assurer son bon fonctionnement.

Un dispositif d'observation du champs de déformation locale est nécessaire pour atteindre le deuxième but de l'étude.

le MES doit éviter toute vibration provenant de l'extérieur, surtout le choc produit par la MTGV au début de la sollicitation.

Les erreurs géométriques et dimensionnelles des éprouvettes sont liées à leur fabrication. Le MES doit prendre en compte et limiter leurs influences sur l'état de contrainte plane et l'erreur de répétitivité des essais. Cette fonction interagit avec la fonction de changement d'éprouvette dans le but d'assurer la sollicitation souhaitée.

Définition d'autres fonctions de MES

Le MES doit éviter les facteurs perturbateurs qui influencent le phénomène. Il ne doit pas créer lui-même des perturbations. Les facteurs d'influence que nous avons identifiés à l'étape précédente, bien qu'ils soient négligés ensuite, seront considérés comme des contraintes pour

le MES. Ici, nous mettons l'accent sur l'effet d'inertie car la masse du MES ne sera pas négligeable.

Les autres fonctions de contraintes qu'on doit identifier sont les contraintes de l'environnement du MES tel que l'encombrement disponible sur la MTGV, les normes de sécurité, le contexte de montage et de transport, etc. Cette analyse ne relève pas des connaissances spécifiques de l'expérimentation à réaliser.

Caractérisation des fonctions

Comme présenter sur la Fig. 42, les paramètres d'entrée et de sortie de l'expérimentation sont les premiers critères d'appréciation des fonctions principales. Mais ils ne sont pas les seuls. L'analyse des interactions entre le MES et le système à étudier nous permet d'identifier d'autres critères comme :

- La charge que le MES doit subir pendant l'essai correspond à l'effort de rupture de l'éprouvette (inconnu). Une hypothèse sur le comportement dynamique du matériaux pour en estimer la valeur est donc nécessaire.
- La vibration due à la rupture de l'éprouvette au cours des essais est inévitable. Donc pour éviter la résonance du MES, son mode propre doit être éloignée de la fréquence de sollicitation (du 1kHz à 20 kHz).
- Pour assurer une sollicitation considérée comme en contrainte plane (pour une perturbation de moins de 5% du résultat d'essais), la précision entre axe du plan de la sollicitation et le plan de symétrique de l'éprouvette doit être inférieure à 2°. En prenant en compte que l'erreur de positionnement de l'éprouvette sur le mors du MES (due à ses erreurs de fabrication et au fixation par collage) peut atteindre 0,5 mm, la précision entre les axes des deux parties du MES doit être inférieure à 0,2 mm qui correspond à 1° de défaut d'alignement.

Ci dessous le tableau récapitulatif des fonctions principales du MES (Tableau 8)

N°	Description	Connections	Critères d'appréciation	Niveaux
<i>Les fonctions de première ordre.</i>				
F1	Transmettre le mouvement dynamique	MTGV $\Rightarrow$ éprouvette	Vitesse de déplacement V Angle de la sollicitation α Charge approximative Précision entre axes	0,1 $\rightarrow$ 20m/s $\pm$ 2% 0°, 45°, 90° ($\pm$ 1°) 10 à 20 KN < 0,2mm
F2	Changer l'éprouvettes	Expérimentateur $\Rightarrow$ éprouvette	Temps de changement Erreur de positionnement	Moins de 30 min $\pm$ 0,2 mm
F3	Transmettre l'effort de sollicitation en temps réel	Eprouvette $\Rightarrow$ capteur de force de la MTGV	Erreur de l'effort transmis	$\pm$ 1% de la valeur mesurée
F4	Mesurer l'allongement de l'éprouvette en temps réel	Eprouvette $\Rightarrow$ dispo. Zimmer	Précision de mesure	5 μ m

F5	Observer le champs de déformation locale au cours d'essai	Epreuve ⇒ chercheurs et expérimentateurs	Nombre de points observés	maillage EF
			Précision d'observation	5 μm
			Nombre d'observations	Minimum 4
Les fonctions de seconde ordre				
F6	Isoler les vibration proche de la sollicitation dynamique	Environnement ⇒ Epreuve	Sollicitation dynamique	De 1kHz à 20 kHz
F7	Eviter l'influence des erreurs géométriques de l'éprouvette	Epreuve ⇒ sollicitation	Erreur en parallélisme	± 1°
			Erreur en dimensionnement	0,1 mm

Tableau 8. Récapitulation des fonctions principales du MES.

2.2 Remarque

Cette analyse permet la rédaction d'un cahier des charges et apporte les informations nécessaires à la construction du protocole d'essai et de contrôle de la validité des résultats.

Exemple d'informations :

- Les recommandations pour la fabrication des éprouvettes (erreurs géométriques, taux d'humidité, états de surface, ...)
- La préparation des essais : pour supprimer les éventuels jeux avant la sollicitation dynamique, l'ensemble du système de MES et d'éprouvette doit être mise sous précontrainte.

L'étude de ce Cahier des Charges démontre que l'ancien système d'ARCAN (Fig. 34) ne peut être amélioré. Une conception d'un MES nouveau est nécessaire.

3 Validation de l'ACCP

Deux projets de développement des MES sont utilisés pour expérimenter cet outil. Ce sont les projets : « Maîtrise et asservissement du chariot » et « reconception d'une mini machine de traction ». Ces projets nous permettent de tester l'efficacité de l'outil ACCP dans deux situations différentes : la reconception d'un produit existant et la conception d'un nouveau produit.

L'expérimentation de l'outil dans le cadre du projet « reconception de la mini machine de traction » a pour objectif de comparer la conception avant et après l'utilisation de l'ACCP afin de démontrer sa valeur ajoutée en conception. Mais notre objectif est de trouver une cohérence en coût/performance dès la première conception, c'est donc dans le cadre du projet « Maîtrise et asservissement du chariot » que l'outil pourra être validé. Ci-dessous nous présentons ce projet. Il consiste à développer un banc d'essais nommé « MACHA » utilisé pour l'étude de la Maîtrise et de l'Asservissement d'une masse (le chariot) sous l'effet de la pesanteur.

3.1 Projet Maîtrise et Asservissement du CHAriot (MACHA)

3.1.1 Contexte de l'étude

Dans le cadre d'un projet de recherche du laboratoire d'automatisme de l'ENSAM, ce projet propose la conception, la fabrication puis la mise en oeuvre d'un banc d'essai qui permettra de faire du contrôle actif et d'étudier la robustesse des lois de commande en milieu industriel. L'ensemble de la chaîne d'asservissement est contrôlée par le module temps réel de Matlab-Simulink (D-Space) qui permet également de tester les procédures de réglages des correcteurs usuellement utilisés dans l'industrie [COLLIER 03].

I

F

Position initiale

Position

intermédiaire

Position finale

C

G

D

Ce banc d'essais est un simulateur qui permet l'étude du mouvement d'un chariot sur son rail. Le Fig. 47 ci-dessous présente la cinématique de cette machine.

Fig.47. Cinématique de la machine MACHA

Une masse C peut librement glisser sur le rail GD grâce à son poids. Afin de déplacer la masse C du point I au point F, le rail GD doit être commandé dans son déplacement vertical et angulaire. Les deux extrémités du rail GD sont pour cela asservies en position grâce à la commande en boucle fermée des moteurs électriques.

Notre étude consiste à concevoir les deux actionneurs Gauche (G) et Droite (D) qui transforment la rotation des moteurs en translation des extrémités G et D du rail GD

La similitude en fonctionnement et en charge des deux actionneurs oriente notre étude vers deux actionneurs identiques. Seuls les modes de fixation des chariots seront différents.

Dans le cadre de ce rapport, nous présentons la partie d'étude relative à la conception d'un actionneur où une masse est déplacée verticalement par pilotage à commande numérique, en temps réel, avec boucle d'asservissement fermée.

Cahier des Charges pour l'actionneur :

Fonction principale : déplacer une masse M d'un point A à un point B en fonction de la consigne de commande :

•	•	Le masse	15,5 kg
•	•	La vitesse maximale de la masse	8m/s.
•	•	L'accélération maximale de la masse	$\pm 20\text{m/s}^2$
•	•	La course maximale de la masse	1800mm
•	•	La précision en verticale de la position de la masse	$\pm 0,5\text{mm}$
•	•	La sensibilité du système	minimale

Fonctions contraintes : éviter la résonance et le bruit (<50dB). La machine doit être montée dans l'atelier puis transportée au laboratoire par transpalette. L'encombrement doit permettre le passage aux portes.

Sécurité : prévoir un arrêt d'urgence. Bloquer en position au moment d'une éventuelle coupure de courant.

Durée de vie : environ 10.000 cycles

Budget dédié : 15000 € pour chaque actionneur

Délai : quatre mois

3.1.2 Cohérence approximative – phase descendante de l'ACCP

Commençons par l'identification de l'arbre fonctionnel. Si F est la fonction de service « déplacer la masse d'un point A à un point B donné », alors F_1 est la fonction technique « entraîner la masse » et F_2 la fonction technique « guider la masse suivant la trajectoire de A à B » (Fig. 48).

Fig.48. Niveau 1 de l'arbre fonctionnel.

F : Déplacer la masse

F : Guider

la masse

F₁ : Entraîner

La masse

Analyse les relation Critères – Performances du niveau 1

Nous identifions les critères d'appréciation de la fonction F selon le CdCF. En suite, nous déterminons les performances techniques nécessaires aux fonctions F₁ et F₂ :

Les C_i sont les critères d'appréciation de la fonction F :

- C₁ est le masse 15,5 kg
- C₂ est la vitesse maximale de la masse 8m/s.
- C₃ est l'accélération maximale de la masse ±20m/s²
- C₄ est la course maximale de la masse 1800mm
- C₅ est la précision de la position verticale de la masse ± 0,5mm
- C₆ est la durée de vie 10.000 cycles
- C₇ est la sensibilité du système minimale

Les P_{1X} sont les Performances techniques nécessaires (ou critères d'appréciation) de la fonction F₁ et les P_{2Y} sont les Performances techniques nécessaires (ou critères d'appréciation) de la fonction F₂ :

- P₂₁ charge nominale
- P₂₂ vitesse maximale
- P₂₃ course maximale
- P₂₄ frottement

- • P₂₅ précision statique
- • P₂₆ durée de vie
- • P₁₁ force nominale
- • P₁₂ vitesse maximale
- • P₁₃ accélération maximale
- • P₁₄ course maximale
- • P₁₅ précision dynamique
- • P₁₆ durée de vie

En analysant les relations entre C et P (Fig. 49), nous pouvons séparer les relations rigides (les lignes continues) des relations souples (les lignes en pointillées).

Fig.49.

$$C_1$$
$$C_2$$
$$C_3$$
$$C_4$$
$$C_5$$
$$C_6$$
$$C_7$$

F

P_{11}

$$P_{12}$$

P₁₃

P_{14}

P_{15}

P_{16}

F₁P₂₁P₂₂P₂₃P₂₄P₂₅P₂₆F₂

Relations Critères – Performances du niveau 1

Pour avoir plus de lisibilité, nous utilisons une autre présentation de cette analyse sous forme de tableau (tableau 9 suivant). Les colonnes présentent les paramètres qui influencent les paramètres en lignes, X présente la relation rigide et O présente la relation souple. Sur les lignes en gris, les paramètres sont déjà connus ou sont déterminés par les relations rigides. Sur les lignes blanches, les paramètres seront déterminés par le mécanisme de l'ACCP avec d'autres paramètres de même niveau.

Niveau 1		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₂₅	P ₂₆
Entraîner F ₁	P ₁₁ force nominale	O		O														O		
	P ₁₂ vitesse maximale		X																	
	P ₁₃ accélération maximale			X																
	P ₁₄ course maximale				X															
	P ₁₅ précision dynamique					X														
	P ₁₆ durée de vie						X													
Guider F ₂	P ₂₁ charge nominale	X																		
	P ₂₂ vitesse maximale		X																	
	P ₂₃ course maximale				X															
	P ₂₄ frottement	O		O				0												
	P ₂₅ précision statique					X														
	P ₂₆ durée de vie						X													

Tableau 9. Relations Critères – Performances du niveau 1

[illegible]

Le tableau 11 ci-dessous présente le résultat de notre analyse des relations Critères – Performance de ce troisième niveau.

Niveau 3		P ₄₁	P ₄₂	P ₄₃	P ₄₄	P ₄₅	P ₄₆	P ₄₇	P ₅₁	P ₅₂	P ₅₃	P ₅₄	P ₅₅	P ₆₁	P ₆₂	P ₆₃	P ₆₄	P ₆₅	P ₆₆	P ₆₇
F ₅	Réduction P ₅₁ couple à transmis	O	O											O	O	O			O	
	P ₅₂ rapport de réduction			O												O				
	P ₅₃ précision dynamique					O												O		
	P ₅₄ inertie propre	O		O			O							O					O	
	P ₅₅ durée de vie							X												
F ₆	Transfor- P ₆₁ charge nominale	X	X																	
	-mation de P ₆₂ pré-charge	X																		
	mouvement P ₆₃ rapport rotation/translat°			O					O									O		
	P ₆₄ course maximale				X															
	P ₆₅ précision dynamique				O	O				O										
	P ₆₆ inertie propre	O		O	O		O									O				
	P ₆₇ durée de vie							X												

Tableau 11. Relations Critères – Performances du niveau 3

Les calculs de courroie imposent le rapport de réduction $P_{52} = \frac{1}{2}$. En tenant compte de la contrainte de vibration et du faible rapport de réduction, on utilise la réduction par courroie crantée. A ce stade de l'étude, on a déterminé toutes les solutions techniques pour la construction de l'actionneur. Mais certaines performances qui correspondent à la puissance restent à préciser.

3.1.3 Cohérence affinée – phase ascendante de l'ACCP

Après la phase descendante de l'ACCP, la validation et les calculs de dimensionnement constituent la phase ascendante de l'ACCP.

Le calcul du coût de chaque performance et les graphes Coût/Performance ne sont pas présentés ici. Ce sont les rapports des accroissements du coût et de la performance qui nous intéressent, ils nous permettent d'affiner notre choix. Ces informations nous sont données par les fournisseurs.

Nous présentons un exemple d'analyse succincte pour la définition de la courroie à partir des précisions dynamiques de F₅ et F₆.

Nous avons : $P_{65} + P_{53} = P_{45}$ où P₆₅ et P₅₃ sont proportionnelles à la longueur de la partie tendue des courroies, à leurs tensions et inversement proportionnelles à leur raideur.

Pour chaque modèle de courroie standard, le prix est proportionnel à la longueur et à la largeur. Le prix des poulies est proportionnel à leur masse donc ici à la largeur de la poulie. En tenant compte que l'augmentation de l'inertie engendre un surcoût sur le moteur, les calculs finaux du rapport d'accroissement coût/performance pour les précisions P₆₅ et P₅₃ démontrent que la courroie, pour répondre à F₆, doit avoir une raideur propre 15 fois supérieure à celle utilisée pour répondre à F₅. La courroie choisie est donc trois fois plus large et possède une structure 5 fois plus raide.

La confirmation du choix de ces composants standards se fait par l'évaluation de l'effet d'une perturbation sur le rapport coût/performance (par exemple courroie un peu moins large ou un

peu plus large dans le catalogue du fournisseur). Les calculs de validation confirment ce choix.

3.2 Remarque

Dans le projet MACHA, nous calculons la cohérence en coût - performance uniquement pour le choix de composants standards dont le coût représente une part significative du coût global du produit. Les coûts de fabrication des pièces spécifiques peu nombreuses représentent, dans le contexte de fabrication interne au centre de recherche, une part du budget assez faible. Ces pièces ne justifient pas une analyse détaillée.

Ce projet nous a permis d'opérer, sur l'outil ACCP, les quelques améliorations suivantes :

La présentation de l'analyse des relations Critères – Performances sous forme de tableaux est plus parlante que sous forme de graphe.

L'Analyse de la Valeur nécessite une analyse de coût très compliquée [DELAFOLIE 97], [YANNOU 02] ; ce n'est pas le cas dans l'ACCP où l'analyse du coût dédié à chaque performance n'est pas nécessaire. Le mécanisme d'équilibrage de l'ACCP n'a besoin que du taux d'accroissement de coût/performance. Cette information est plus facile à obtenir surtout pour les composants standards.

4 Synthèse de la première série d'expérimentation

Les projets de cette série nous ont permis de valider les deux outils méthodologiques : ANEXOF et ACCP qui correspondent à deux sous hypothèses de notre recherche.

4.1 Validation de la première sous hypothèse - ANEXOF

L'ANEXOF est réellement un support de communication pour les chercheurs et les concepteurs. Tout au long du projet, les membres de l'équipe travaillent dans la compréhension totale. Ils suivent la procédure en toute connaissance de cause. Cette communication installe la confiance entre les deux acteurs principaux. C'est un facteur de réussite.

Les trois projets dans lesquels nous avons utilisé l'ANEXOF, démontrent qu'elle peut être appliquée dans des domaines différents. C'est un outil méthodologique pluridisciplinaire.

L'ANEXOF permet de focaliser les champs de connaissances scientifiques nécessaires et suffisants à la porter des concepteurs. Et inversement, elle permet aux chercheurs de prendre connaissance des facteurs techniques susceptibles d'avoir des interactions au phénomène à étudier. Grâce à l'ANEXOF, cet échange de connaissances peut se réaliser de façon structurée avec efficacité. Et avec ces connaissances, les concepteurs peuvent traduire les paramètres expérimentaux en critères d'appréciation des fonctions de MES.

Dans ces projets, à part l'animateur, les membres de l'équipe de projet ne connaissent pas l'outil au préalable. Mais ils n'ont aucune difficulté pour l'appliquer et après une première expérience, certains sont capable de le réutiliser dans d'autres projets. C'est une preuve de la simplicité d'utilisation de cet outil.

Nous pouvons conclure que l'ANEXOF a répondu à la première sous hypothèse. C'est-à-dire « pouvoir élaborer un cahier des charges fonctionnel plus complet, plus précis et plus compréhensible ».

4.2 Validation de la deuxième sous hypothèse - ACCP

L'ACCP est appliquée dans deux projets dont l'un consiste à la conception d'un banc d'essai nouveau, le MACHA. Le résultat de cette expérimentation est très convaincant. L'ACCP permet de justifier le choix à chaque étape avec des arguments logiques et clairs afin d'optimiser le rapport coût/performance.

Avec cet outil méthodologique, nous pouvons suivre les performances du produit dans les deux sens : du besoin jusqu'aux solutions et des composants de base jusqu'au produit entier. Elle permet aux concepteurs de visualiser les relations complexes en terme de performance entre les différents sous ensembles. Cette vision aide les concepteurs à classer en niveaux de priorité dans leurs calculs et dans leurs choix. La clarté et la traçabilité liée à l'analyse des performances du MES permettent des utilisations ultérieures du MES. C'est une façon de prolonger la durée de vie du produit.

Avec l'ACCP nous avons enfin trouvé un moyen logique pour argumenter certains choix des concepteurs jusqu'alors considérer comme « intuitifs » ou « basé sur l'expérience ».

chapitre 8

Deuxième série d'expérimentations

1 Introduction

Dans cette série d'expérimentations, nous appliquons la démarche dans l'objectif de tester sa structure et son efficacité en terme de résultat final (MES développé) et de gain de temps. Les projets réalisés sont les suivants :

- 14. 1. Projet de machine d'essais de délaminage à grande vitesse de matériaux composites.
- 15. 2. Projet de banc d'essais en fatigue des endoprothèses aortiques fabriquées sur mesure
- 16. 3. Projet de machine de mesure psychométrique MAIN

Ces trois projets sont implantés dans trois domaines de recherche différents : le biomécanique, la physique des matériaux et la métrologie sensorielle. Ils ont abouti à trois types de MES différents : une machine d'essais, un banc d'essais et une machine de mesure.

Le projet « Banc d'essais de délaminage à grande vitesse » est une expérience très intéressante dans la mesure où il nous permet de comparer le résultat de notre étude avec celui d'un développement classique. Dans ce projet, la partie de conception détaillée est réalisée par le BE d'EADS. Cela modifie un peu notre démarche car l'ACCP ne peut intervenir que dans la phase de validation de la conception.

En revanche, le projet « machine de mesure psychométrique MAIN » est un projet composé d'une part, d'un développement de moyen d'expérimentation et d'autre part d'un développement de prototype d'une machine de mesure industrielle. Donc, pour répondre à ces deux objectifs, notre démarche doit obligatoirement être associée à celle de conception d'équipements industriels.

Dans le cadre de ce rapport, nous présenterons en détail le projet « banc d'essais en fatigue des endoprothèses aortiques fabriquées sur mesure ». Ce projet nous a permis de valider étape par étape notre démarche de conception et d'apporter des améliorations nécessaires à une meilleure efficacité de la démarche.

2 Projet banc d'essais en fatigue des endoprothèses aortiques fabriquées sur mesure

2.1 Contexte – Besoin en expérimentation

Dans le domaine de la chirurgie, le traitement chirurgical conventionnel des anévrismes de l'aorte abdominale (AAA) par la « mise à-plat greffe » (Fig. 52), nécessite une large incision abdominale, une déperdition sanguine non négligeable et aboutit à une morbi-mortalité importante chez les malades à risque [KOSKAS 01].

Fig.52. Anévrisme AAA et « mise à-plat greffe » de l'anévrisme

PAROLI, un chirurgien Argentin a proposé, au début des années 1990, un traitement endovasculaire qui consiste, par un abord chirurgical de l'artère fémorale ou iliaque, en l'introduction dans l'aorte d'une endoprothèse (Fig. 53). Son expansion permet d'obtenir à la fois l'exclusion de la poche anévrismale et la revascularisation.

Fig.53. Pose de l'endoprothèse

Les endoprothèses du commerce sont standardisées et ne permettent pas de s'adapter à la morphologie de tous les patients. L'équipe de chirurgie vasculaire du CHU Pitié-Salpêtrière a mis au point une méthode de confection d'endoprothèses sur mesure qui s'adaptent à la géométrie de l'anévrisme aortique traité, à partir de composants disponibles sur le marché (Fig. 54)

Fig.54. Endoprothèse « sure mesure »

Depuis sept ans, il y a déjà plus de 400 endoprothèses implantées. Cependant, ces endoprothèses ne sont pas encore validées par l'AFSSAPS (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé). Les exigences de l'AFSSAPS obligent les vérifications d'un certain nombre de critères dont font partie les critères mécaniques.

Un projet de recherche est planifié avec le partenariat entre l'équipe de chirurgie vasculaire du CHU Pitié-Salpêtrière et le Laboratoire Biomécanique de l'ENSAM – Paris. Ce projet a pour objectif l'évaluation pré-clinique in vitro des endoprothèses « sur mesure ».

Ces endoprothèses sont des produits nouveaux dont l'évaluation n'est pas régie par une norme. Notre but est de formaliser un nombre suffisant de critères convaincants qui permettent une comparaison avec les produits standards du commerce qui sont acceptés par l'AFSSAPS. Il faut ensuite démontrer que le produit respecte ces critères. Les essais statiques sont validés grâce aux travaux de l'équipe au cours de l'année 2000-2001 [VOULGRE 01]. Il nous reste l'évaluation dynamique, c'est-à-dire, de tester la solidité et la durabilité des endoprothèses dans des conditions qui se rapprochent de l'environnement in vivo.

Le projet a débuté en décembre 2001. L'équipe de projet est constituée :

- Des spécialistes en chirurgie vasculaire du CHU Pitié-Salpêtrière : 2 personnes
- Des chercheurs du Laboratoire Biomécanique de l'ENSAM : 3 personnes
- Des étudiants du Laboratoire Biomécanique de l'ENSAM : 2 personnes
- Des concepteurs du Laboratoire de Prototypes de l'ENSAM : 2 personnes

Ci dessous le déroulement de notre travail.

2.2 ANEXOF

2.2.1 Formalisation du problème

Selon l'exigence de l'AFSSAPS, **les endoprothèses sur mesure doivent avoir une durée de vie de 10 ans minimum**. Notre problème est donc de le prouver grâce aux essais de fatigue « in vitro » qui reproduisent les phénomènes d'endommagements aussi proche que possible de l'utilisation « in vivo ». Notre objectif est de valider dix ans de fonctionnement en six mois d'essais.

Définition du but de l'étude et des objectifs à atteindre.

Le but final de notre étude est de valider la conformité du produit (endoprothèse fabriquée sur mesure par le chirurgien) aux exigences de l'AFSSAPS. A première vue, nous nous situons dans la quatrième et dernière catégorie d'expérimentation, celle de la validation d'un produit par rapport à son cahier des charges.

En tenant compte du caractère nouveau du domaine d'application de ce produit (depuis 1990 pour les endoprothèses standards et depuis 1995 pour les endoprothèses sur mesure), les connaissances sur le comportement en fatigue des endoprothèses in vivo sont très faibles. Nous savons seulement que les premiers implants, il y a sept ans, fonctionnent encore.

Nous n'avons pas un cahier des charges explicite qui permet une validation in vitro.

Cependant, notre but est d'identifier un modèle d'essais in vitro qui permet de valider en fatigue le fonctionnement in vivo des endoprothèses sur mesure.

Ce but nous met dans le contexte de l'expérimentation de caractérisation. C'est le cas où l'analyse de l'expérimentation a toute son importance dans la réussite du projet.

Les objectifs de notre étude sont les suivants :

- Identification des facteurs d'endommagement potentiels (facteurs mécaniques, chimiques, biologiques, etc.)
- Identification du mode de sollicitation en fatigue des endoprothèses.
- Caractérisation quantitative du comportement des endoprothèses sous l'influence des facteurs d'endommagement.

Pour d'atteindre le but fixé, les trois objectifs ci-dessus sont aussi importants l'un que l'autre. L'identification du mode de sollicitation en fatigue sera traité en premier.

Moyens nécessaires à la mise en œuvre de l'expérimentation.

Il existe sur le marché une machine d'essais des endoprothèses qui est développée aux Etats-Unis. Elle n'est pas abordable d'une part par son prix très élevé (environ 1000.000 \$) et d'autre part par son inadaptation aux endoprothèses fabriqués sur mesure.

C'est une machine de contrôle qualité dans la chaîne de production d'endoprothèses standards. Elle permet de tester 8 endoprothèses en même temps. Notre besoin est limité au cadre de la recherche en laboratoire et ne demande aucune productivité. Par contre, nous sommes exigeants sur la capacité d'adaptation aux différents types d'endoprothèse, aux différents modèles d'essais éventuels nous permettant d'atteindre nos objectifs. **Nous envisageons de développer un banc d'essais spécifique pour notre étude.**

Limite de l'étude.

Pour atteindre ces objectifs, nous commençons par une étude des facteurs mécaniques car ils sont les plus importants dans l'endommagement en fatigue.

Les influences des facteurs chimiques sont très faibles car les matériaux utilisés pour la fabrication des endoprothèses sont insensibles à l'ambiance du sang.

Juste après la pose, nous remarquons que l'endoprothèse est libre. Elle ne se positionne que par ses extrémités en s'appuyant sur les collets inférieurs et supérieurs de l'anévrisme (Fig. 48 ci dessus). L'écoulement du sang se produit à l'intérieur et aussi à travers la paroi de l'endoprothèse. Après un certain temps, le sang forme une structure fibreuse qui empêche peu à peu l'écoulement à travers la paroi. L'endoprothèse est alors stabilisée.

La formation de cette structure fibreuse permet, selon notre hypothèse, de renforcer la résistance de l'endoprothèse. Ces facteurs biologiques feront l'objet d'une autre étude ultérieure ? ils vont plutôt dans le sens de la protection de l'endoprothèse. Nous faisons donc l'hypothèse d'un rôle favorable par rapport à la durée de vie. Dans le cadre de cette étude, nous ignorons ces facteurs biologiques pour nous pencher plus spécifiquement sur les sollicitations mécaniques que doit subir l'endoprothèse.

Dans un premier temps, les tests de durée de vie sont destinés à des endoprothèses cylindriques.

Le budget prévisionnel est de 10.000 € pour le premier prototype du banc d'essais.

Le délai pour le développement est de 12 mois.

Le banc d'essais doit, selon nos chercheurs, permettre de tester plusieurs échantillons successifs représentant en moyenne de 320 millions de cycles. Donc la durée de vie du banc d'essais est un critère important.

Système à étudier.

Le système à étudier est une sorte de ressort tubulaire prisonnier dans un manchon en tissu (Fig. 55).

Fig.55.

Sutures

Endoprothèse avec et sans membrane

L'endoprothèse est constituée d'un ensemble de « stent » (ressort radial en zigzag), reliés entre eux par des sutures, et recouvertes par une membrane en Dacron (épaisseur 0,3 mm). Cette endoprothèse se différencie de celle du commerce, car elle est fabriquée sur mesure en fonction de la morphologie de l'anévrisme du patient. La section de membrane peut être variable le long de l'endoprothèse.

2.2.2 Définition du modèle expérimental

Avant d'analyser le flux des paramètres d'entrée et de sortie, nous devons analyser le comportement in vivo du produit.

Les exigences de l'AFSSAPS portent sur la condition in vivo moyenne d'un patient : la durée de vie de l'endoprothèse est de 320 millions de cycles, les pressions sanguines valent 6-12 (60 mm Hg à 120 mm Hg) pour une fréquence de 1 Hz à 1,2 Hz (battement de 60 à 72 fois par minute).

Analyse du cas in vivo

Les photos de scanner nous montrent que les endoprothèses subissent des déformations statiques et alternatives mesurables. Les déformation alternatives travaillent dans deux directions : radiale et longitudinale, donc nous proposons une analyse ci-dessous.

Fig.56. Endoprothèse en place – Déformation angulaire α .

- Les sollicitations liées au positionnement de l'endoprothèse dans l'aorte du patient peuvent être identifiées à celles observées pour un angle de courbure α en fonction de la morphologie du patient (Fig. 52).
- Une sollicitation, due à la pression sanguine, provoque la déformation radiale de l'endoprothèse. La pression sanguine varie de 60 à 120 mm Hg avec une fréquence de 1 Hz à 1,2 Hz.
- Une sollicitation est créée par l'énergie dynamique du flux sanguin et l'élasticité de l'aorte sur l'endoprothèse. Cette sollicitation déforme l'endoprothèse longitudinalement avec la même fréquence que la sollicitation radiale.

La compression radiale de l'aorte sur l'endoprothèse est non mesurable et selon notre observation, dans la zone anévrysmale, elle est très faible mais reste à vérifier.

La pression sanguine et l'énergie dynamique de flux sanguin sont localement non mesurable avec précision. Nous devons donc utiliser les paramètres de la déformation comme des paramètres d'entrée de notre expérimentation. Donc nous adoptons la stratégie de modélisation semi inversée. C'est-à-dire que le modèle d'essais se construit en s'appuyant sur les hypothèses dont la validation serait achevée grâce aux essais.

Analyse du cas in vitro – modèle d'expérimentation

Afin de solliciter l'endoprothèse d'une façon proche de son utilisation in vivo, nous décidons d'immerger l'endoprothèse à tester dans un liquide qui sera utilisé comme un médium pour la sollicitation souhaitée.

Flux des paramètres d'entrée.

Ce modèle doit permettre de comparer le travail de l'endoprothèse entre la condition in vivo et le test in vitro. Les images de scanner nous permettent d'identifier certaines déformations de l'endoprothèse. Les paramètres d'entrée seront les suivants :

- La fréquence de la sollicitation dynamique. Puisqu'il faut évaluer 10 ans de durée de vie (320 millions de cycles selon exigence de l'AFSSAPS) en six mois d'essais, la fréquence des sollicitations doit être supérieure à 20 Hz, donc près de vingt fois la fréquence in vivo. Nous faisons la première hypothèse (H1) qu'en dessous d'un certain seuil (à définir) la

fréquence de sollicitation n'influencera pas la tenue en fatigue du produit. Pour identifier ce seuil, nous devons essayer des fréquences de 1Hz à 20Hz.

- • La déformation radiale alternative. Les images de scanner permettent, en effet, de donner une première approximation de la déformation radiale de moins de 1 mm d'amplitude.
- • La déformation longitudinale statique et alternative. Nous obtenons une déformation alternative en compression de moins de 1 mm (pour des endoprothèses de 8 stents), La déformation statique longitudinale, selon notre hypothèse (H2), est négligeable (trop faible pour la mesurer par des images de scanner)
- • La déformation angulaire en statique. Ce paramètre n'est pas exigé dans les critères de l'AFSSAPS, nous ne l'étudions donc pas dans un premier temps.
- • Types des endoprothèses à tester. Afin de valider le modèle d'expérimentation, nous testons les endoprothèses standards (A) et celles « sur mesure » (B). Le type d'endoprothèse B est en forme de tube avec les diamètres des deux extrémités différents d_1 et d_2 .

Flux des paramètres de sortie.

Le premier but de cette étude est de valider le modèle d'expérimentation. Nous devons mesurer les paramètres suivants :

- • La pression du liquide à l'intérieur de l'endoprothèse.
- • Le nombre de cycles de la sollicitation dynamique jusqu'à la rupture. Le seuil d'endommagement de l'endoprothèse est l'apparition d'une fuite de 0,5 mm de diamètre.

Le modèle d'expérimentation est présenté dans la Fig. 57 ci-dessous.

Fig.57.

Ecoulement interne P

Sollicitation radiale

α

Sollicitation longitudinale

T

Modèle d'essais

Le modèle d'expérimentation comprend :

- Un support d'endoprothèse qui permet de fixer une extrémité et de laisser l'autre extrémité libre (avec deux degrés de liberté Fig. 55).
- Le liquide dans lequel immerge l'endoprothèse à tester, a un écoulement interne à l'endoprothèse qui permet de la solliciter radialement.
- Une sollicitation en compression T sur une extrémité de l'endoprothèse permet de créer les déformations longitudinales alternatives.

Le modèle de la boîte noire est présenté dans la Fig. 58 ci dessous :

Fig.58.

Nombre de cycles à la rupture

Pressions interne

Pression externe

Déformation radiale R

Déformation longitudinale L

Types de l'endoprothèse d_1-d_2

Déformation angulaire $\alpha=0^\circ$

Fréquence de sollicitation f

La boîte noire de l'expérimentation.

Identification des facteurs perturbateurs

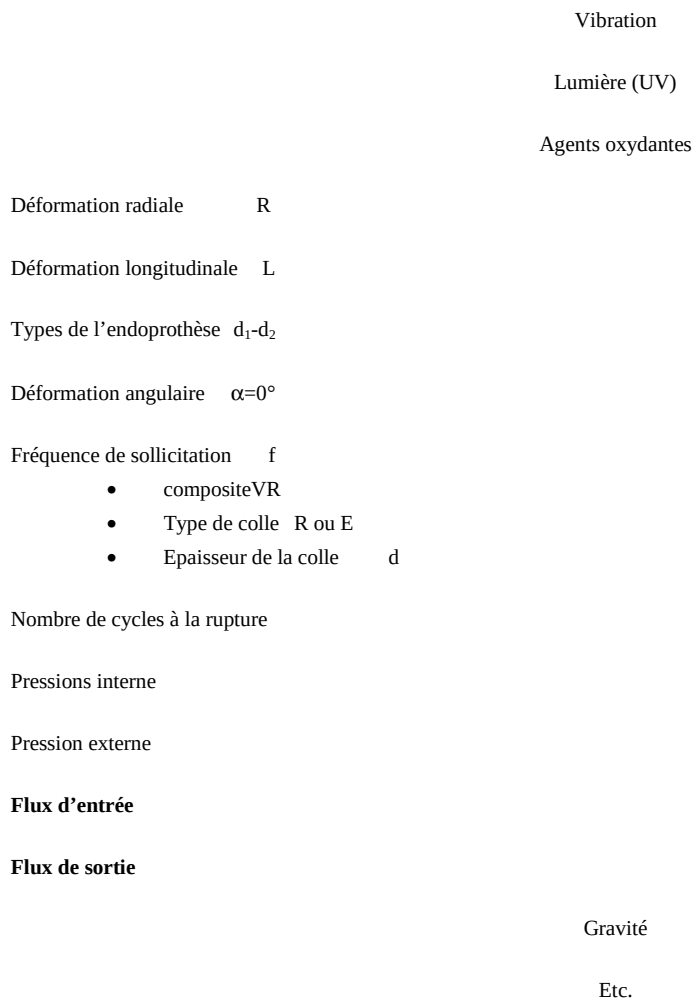
Les facteurs perturbateurs sont déterminés grâce aux analyses qui comparent des milieux extérieurs du système d'endoprothèse in vivo et in vitro. Ils sont classés par ordre d'importance. A titre d'exemple :

- La différence entre le sang et le liquide utilisé : Cette différence peut modifier la durée de vie du produit du point de vue mécanique (la viscosité, la mouillabilité, la densité, etc.), chimique (oxydation etc.), thermique, etc...
- La vibration provenant de l'extérieur autres que la sollicitation souhaitée (par exemple le banc d'essais) : Elle peut provoquer l'endommagement plus rapide de l'endoprothèse, surtout des sutures de membrane.

- La différence en durée de vie entre une endoprothèse neuve et celle qui a subi les manipulations de « pose ». Ce facteur peut être résolu en faisant une « pose in vitro » des endoprothèses avant leurs essais en fatigue.
- La position de l'endoprothèse in vivo est principalement verticale, les essais in vitro doivent positionner les endoprothèses aussi verticalement afin d'éviter l'effet de gravité liée à leur poids.
- L'UV : Elle peut provoquer le vieillissement du tissu.

Le modèle d'expérimentation réel doit tenir compte de ces perturbations (Fig. 59).

Fig.59.



Modèle d'expérimentation des endoprothèses en fatigue.

2.2.3 Elaboration du CdCf

Cette étape consiste à définir le cahier des charges fonctionnel grâce aux analyses ci-dessus.

La détermination des fonctions principales

On visualise les fonctions principales de premier ordre qui permettent de créer le flux des paramètres d'entrée et de capter les paramètres de sortie (Fig. 60)

Fig.60.

MES

Vibration

Lumière (UV)

Agents oxydantes

Déformation radiale R

Déformation longitudinale L

Types de l'endoprothèse d_1 - d_2

Déformation angulaire $\alpha=0^\circ$

Fréquence de sollicitation f

- compositeVR
- Type de colle R ou E
- Epaisseur de la colle d

Nombre de cycles à la rupture

Pressions interne

Pression externe

Flux d'entrée

Flux de sortie

Gravité

Etc.

Positionnement du MES dans le modèle d'expérimentation.

Les fonctions principales du banc d'essais en fatigue des endoprothèses sur mesure sont recensées ci-dessous :

- Installer l'endoprothèse sur le banc d'essai.
- Reproduire la sollicitation de l'endoprothèse à l'identique qu'in vivo mais vingt fois plus rapide.
- Détecter l'endommagement de l'endoprothèse au cours d'essais.
- Compter le nombre de cycles jusqu'à la rupture de l'endoprothèse.
- Mesurer la pression à l'intérieur de l'endoprothèse pendant l'essai.

On visualise les fonctions de deuxième ordre qui permettent d'éviter les facteurs perturbateurs.

- Approcher les caractéristiques du liquide de celles du sang.
- Isoler le système d'essai de toutes les sources de vibration.
- Positionner l'endoprothèse verticalement.
- Eviter les lumières directes sur le système pendant l'essai.

Ci dessous le tableau récapitulatif des fonctions principales du banc d'essais.

N°	Description	Connections	Critères d'appréciation	Niveaux
<i>Les fonctions de première ordre.</i>				
F1	Installer l'endoprothèse sur le système d'essais	Expérimentateur ⇒ endoprothèse	Etanchéité du système Le niveau de difficulté Types des endoprothèses	0,33 bar moyen A et B
F2	Reproduire la sollicitation de l'endoprothèse à l'identique	Liquide ⇒ endoprothèse	Etanchéité du système	0,33 bar

	qu'in vivo		Type de sollicitation	sinusoïdale
			Sollicitation radiale	0 à $2 \pm 0,1$ mm
			Sollicitation longitudinale	0 à $1 \pm 0,1$ (mm)
			Fréquence de la sollicitation	1Hz à 25 Hz
F3	Observer l'endoprothèse au cour d'essai	Expérimentateur $\Rightarrow$ endoprothèse	Zone de visualisation	Endo. entière
			Seuil de défauts détectés	0,5 mm
F4	Compter le nombre de cycle	Expérimentateur $\Rightarrow$ endoprothèse	Capacité d'affichage	9 chiffres
			Arête	manuel
F5	Mesurer la pression interne de l'endoprothèse pendant l'essais	Endoprothèse $\Rightarrow$ expérimentateurs	Pression maximale	0,33 bar
			Précision de mesurer	1 mm Hg
<i>Les fonctions de seconde ordre</i>				
F6	Isoler tous les vibration externes	Environnement $\Rightarrow$ endoprothèse	Fréquence à isoler	Supérieur de 0,5Hz
F7	Eviter l'influence d'UV	UV $\Rightarrow$ endoprothèse	Temps exposé au UV	24 h
			Densité d'UV	
F8	Positionner l'endoprothèse en verticale	Gravité $\Rightarrow$ endoprothèse	précision	15°

Tableau 12. Récapitulation des fonctions principales du banc d'essais des endoprothèses sur mesure en fatigue.

Détermination d'autres fonctions

Tout d'abord, le ME ne doit pas être une source de facteurs perturbateurs. Les informations acquises aident à définir ces facteurs :

- Ne pas utiliser une lumière puissante pendant une longue période.
- Eviter tous les éléments chimiques nuisibles au déroulement du test

L'utilisation des méthodes existantes ; notamment l'analyse fonctionnelle externe, déterminera les autres fonctions liées aux normes de sécurité, au montage, à l'ergonomie, etc. Ils sont liés à

- Emplacement dédié au banc d'essais
- Protection contre les fuites
- Problème de coupure de courant
- Etc.

2.3 Conception du banc

A partir du cahier des charges prédéfini ci-dessus, la phase de conception du banc d'essais est développée en quatre étape :

18. 1. Recherche des solutions et définition du schéma cinématique
19. 2. Définition préliminaire permet d'identifier les techniques employées

20. 3. Définition détaillée permet de choisir des composants standards et de produire des plans de pièces à fabriquer
21. 4. Rédaction des documents permet de produire le document technique du banc (plans des composants, notice de montage et d'entretien, la capacité du banc, etc.) de formaliser le protocole d'essais et la notice d'utilisation du banc d'essais.

Dans cette phase, nous utilisons l'ACCP à plusieurs reprises. Ci-dessous les détails de notre étude.

2.3.1 Recherche des solutions

F₁ Installer l'endoprothèse sur le système d'essais : Pour cette fonction, la solution (S₁) est donc simplement de maintenir les deux extrémités par des anneaux : une reste fixe et l'autre extrémité doit être coulissante. En présence du liquide dans le système, l'installation de l'endoprothèse sur le banc sera manuelle et assurée par l'expérimentateur. Donc, il y a une contrainte : faciliter le montage de l'endoprothèse. Elle nous oblige à utiliser des techniques d'assemblage démontables. Le critère d'étanchéité de 0,33 bar est assez facile à obtenir avec des composants de serrage tuyauterie standards et des joints toriques.

F₂ Reproduire la sollicitation de l'endoprothèse à l'identique qu'in vivo avec une fréquence 20 fois plus importante. C'est une fonction complexe son arbre fonctionnel est présenté sur la Fig. 61 :

Fig.61.

F₂ Reproduire la sollicitation de l'endoprothèse à l'identique qu'in vivo (fréquence 20 Hz)

F₂₃ Mesurer la déformation de l'endoprothèse au cours d'essais

F₂₁ solliciter radialement l'endoprothèse de façon alternative

F₂₂ solliciter longitudinalement l'endoprothèse de façon alternative

F₂₅ Régler l'amplitude du changement de volume

F₂₄ Créer un changement de volume liquide à l'intérieur d'endoprothèse

F₂₇ Régler l'amplitude du mouvement

F₂₆ Créer le mouvement alternatif

S₂

S₃

S₄

S₅

S₆

Arbre fonctionnel pour F₂

Afin de coordonner les paramètres de sollicitation avec les paramètres d'entrée qui sont données sous formes de déformations radiales et longitudinales, ceux-ci doivent être mesurés. S₂ permet aux expérimentateurs de mesurer la déformation de l'endoprothèse en cours d'essai. Nous avons besoin d'un microscope qui permet d'agrandir l'image et avec une grille qui permette la mesure radiale et longitudinale de l'endoprothèse. Pour une déformation maximum de 2 mm et une précision de 0,1 mm, le microscope doit avoir un zoom minimum de 10 fois. Le laboratoire dispose d'un microscope qui correspond.

La sollicitation des endoprothèses in vivo est assurée par l'écoulement du sang. Mais la reproduction de cette phénomène in vitro relève de l'impossibilité technique car la fréquence dans le cas in vitro est 20 fois plus élevé. Selon le théorème de Bernoulli, la longueur d'onde sera beaucoup plus court. En comparant avec la longueur de l'endoprothèse, il est donc impossible d'obtenir la même sollicitation que dans le cas in vivo.

Puisque la longueur maximum des endoprothèses à tester est moins de ½ de la longueur d'onde du sang in vivo, pour la sollicitation radiale, nous utilisons la pression du liquide enfermé dans l'endoprothèse (pas écoulement). Cette solution (S₃) permet une sollicitation très proche du cas in vivo. Puisque le liquide utilisé est incompressible, l'amplitude de la déformation radiale sera réglée par le changement de volume de liquide dans l'endoprothèse (S₄).

Pour la sollicitation longitudinale, nous pouvons manipuler une extrémité de l'endoprothèse en profitant de la pression du liquide sur l'extrémité de l'endoprothèse afin de créer la sollicitation alternative. Pour modéliser l'élasticité de l'aorte, un ressort de compression qui s'appuie sur une extrémité sera suffisant (S₅). Pour régler l'amplitude de la sollicitation, nous pouvons régler l'effort du ressort (S₆).

F₃ Mesurer la pression interne de l'endoprothèse : Cette fonction peut être assurée par une méthode de mesure intra-artérielle (S₇).

F₄ Observer l'endoprothèse en cours d'essai : Cette fonction a pour but de détecter l'endommagement de l'endoprothèse en cours d'essai. Comme le critère d'évaluation est peu précis (défaut de 0,5 mm est visible à l'oeil nu et le nombre de cycle peut varier de + 2% ce

qui correspond à plus de deux journées d'essai). Nous choisissons la solution de l'observation à l'oeil nu. F₄ devient donc une fonction de contrainte : Permettre aux expérimentateurs d'observer entièrement l'endoprothèse en cours d'essai. La solution la plus simple est d'utiliser des matériaux transparents pour les parois autour de l'endoprothèse.

F₅ Compter le nombre de cycle : Cette fonction peut être assurée par un compteur de tours (S₈) branché sur une sortie de S₃ ou S₅.

F₆ Isoler toutes les vibrations externes y compris les vibrations du banc d'essais : Grâce à des isolants en caoutchouc nous pouvons isoler l'endoprothèse des sources de vibrations externes et d'autres organes du banc d'essais. (S₉)

F₇ Eviter l'influence d'UV : Le banc ne sera pas exposer au soleil pendant l'essai. Les lumières diffuse dans la salle sont inoffensives donc pas de consigne particulière.

F₈ Positionner l'endoprothèse en verticale : Cette contrainte sera prise en compte lors de la définition d'architecture.

Fig.62.

Créer et régler le mouvement alternatif (S₅, S₆)

Capteur de pression (S₇)

Créer et régler le changement de volume à l'intérieur de l'endoprothèse (S₃, S₄)

Microscope d'observation et de mesure de la déformation (S₂)

Compter le nombre de cycles (S₈)

Isoler des vibrations externes (S₉)

(S₁)

Schéma cinématique du banc d'essais.

La Fig. 62 présente le schéma cinématique du banc d'essais.

2.3.2 Définition préliminaire

A ce stade de l'étude, nous développons les sous-solutions de S_1 à S_9 afin de constituer une solution technique cohérente du banc d'essais.

S_2 , S_5 , S_6 , S_7 , S_8 , et S_9 sont des composants standards disponibles au laboratoire, nous nous sommes donc concentrés sur l'installation S_1 et le bloc de S_3 - S_4 .

S_1 . Permet de répondre à F_1 , l'installation d'endoprothèse selon le schéma ci-dessus. Les critères d'appréciation sont :

- | | | | |
|---|---|---------------------------------------|---|
| • | • | C_{11} frottement admissible | 5% charge maxi |
| • | • | C_{12} étanchéité du système | 0,33 bar |
| • | • | C_{13} dimensions de l'endoprothèse | d_1 et l constantes, d_2 a 2 valeurs A et B |
| • | • | C_{14} niveau de difficulté | moyen |
| • | • | C_{15} durée de vie | 3 ans ou 6x320 millions de cycles |

L'arbre fonctionnel est présenté dans la Fig. 59 :

Fig.63.

F_1 C_{11} frottement admissible

C_{12} étanchéité du système

	C ₁₃ dimensions d ₁ , d ₂ , l
	C ₁₄ niveau de difficulté
	C ₁₅ durée de vie
F ₁₁	P ₁₁₁ étanchéité du système
	P ₁₁₂ dimensions d ₁
	P ₁₁₃ niveau de difficulté
	P ₁₁₄ durée de vie
F ₁₂	P ₁₂₁ étanchéité du système
	P ₁₂₂ dimensions d ₁
	P ₁₂₃ niveau de difficulté
	P ₁₂₄ durée de vie
F ₁₃	P ₁₃₁ frottement admissible
	P ₁₃₂ étanchéité du système
	P ₁₃₃ dimensions d ₂
	P ₁₃₄ niveau de difficulté
	P ₁₃₅ durée de vie
F ₁₄	P ₁₄₁ étanchéité du système
	P ₁₄₂ dimensions l
	P ₁₄₃ niveau de difficulté
	P ₁₄₄ durée de vie
F ₁₅	P ₁₅₂ étanchéité du système
	P ₁₅₂ niveau de difficulté
	P ₁₅₃ durée de vie

Arbre fonctionnel de la F_1

- • F_{11} : boucher une extrémité de l'endoprothèse
- • F_{12} : fixer l'extrémité supérieure de l'endoprothèse sur un support
- • F_{13} : maintenir l'autre extrémité en coulissant sur le support
- • F_{14} : immerger l'endoprothèse dans un liquide
- • F_{15} : séparer le liquide entre deux compartiments (intérieur et extérieur de l'endoprothèse)

Cette arbre fonctionnel ne présente aucune relation souple donc nous pouvons en déduire tout de suite les performances nécessaires des fonctions filles (Fig. 59). A moins que le bloc S_5 S_6 (système de ressorts en compression et sa vis de réglage) peut se loger dans le compartiment externe de l'endoprothèse. Cela modifiera les dimensions du compartiment mais n'influence pas autre mesure étant donné que la contrainte de l'emplacement n'est pas critique.

La contrainte liée à F_4 (observer l'endoprothèse au cours d'essai) Il est préférable d'aménager l'espace autour de l'endoprothèse. Pour toutes les pièces qui vont obligatoirement gêner la vue, nous sommes obligés d'utiliser des matériaux transparents.

S_3 permet de répondre à la fonction F_{24} : créer un changement de volume à l'intérieur de l'endoprothèse. Les critères d'appréciation sont les suivants :

- | | |
|--|-----------------------------------|
| • • C_{241} volume maxi de liquide échangé | 23 cm ³ |
| • • C_{242} étanchéité du système | 0,33 bar |
| • • C_{243} fréquence maxi - mini | 1Hz à 20 Hz |
| • • C_{244} durée de vie | 3 ans ou 6x320 millions de cycles |

L'arbre fonctionnel est présenté dans la Fig. 64 :

Fig.64.

F ₂₄	C ₂₄₁ volume maxi de liquide échangé
	C ₂₄₂ étanchéité du système
	C ₂₄₃ fréquence maxi - mini
	C ₂₄₄ durée de vie
F ₂₄₁	P ₂₄₁ course maxi
	P ₂₄₂ charge maximum
	P ₂₄₃ fréquence maxi - mini
	P ₂₄₄ durée de vie
F ₂₄₂	P ₂₄₅ course
	P ₂₄₆ section
	P ₂₄₇ rendement
	P ₂₄₈ pression maximum
	P ₂₄₉ fréquence maxi - mini
	P ₂₄₀ durée de vie

Arbre fonctionnel de la F_{24}

- F₂₄₁ créer le mouvement alternatif
- F₂₄₂ Transformer le mouvement alternatif en modifiant le volume du liquide dans l'endoprothèse.

Le tableau 13 ci-dessous présente les relation Critères - Performances de l'arbre fonctionnel (Fig. 64) de la F₂₄.

[illegible]

alternatif → changement du volume	P ₂₄₉ fréquence maxi - mini			X											
	P ₂₄₀ durée de vie				X										

Tableau 13. Relations C – P du premier niveau de l'arbre fonctionnel de la fonction F₂₄.

Selon le tableau 13, la fonction F₂₄₂ n'a que des relation souples entre ses performances. L'identification de la solution ne dépend pas du choix de la solution pour F₂₄₁. Nous commençons notre analyse par là.

Pour la fonction F₂₄₂, après l'identification des performances : volume échangé 23 cm³, fréquence maxi à 20Hz, durée de vie minimum 320 millions de cycle et pression maximum 0,33 bar, nous envisagions deux principes : principe de la membrane souple ou principe du piston. Elles sont tous les deux capable d'assurer les exigences ci-dessous. Nous choisissons le principe de la membrane souple pour plusieurs raisons. La raison la plus importante porte sur le coût très faible (matière première et coût de fabrication) pour une durée de vie plus importante (absence de frottements). De plus, on élimine le risque d'avoir des particules abrasives dans le liquide due à l'usure du piston.

Nous choisissons le système de membrane souple. Pour un meilleur rapport coût/performance, la plupart des pièces seront des pièces standards. Ce choix nous permet de fixer la course P₂₄₅ à 10 mm pour une section moyenne P₂₄₆ de 28 cm². Cette course est aussi la course de P₂₄₁ de la fonction F₂₄₁.

Pour F₂₄₁, deux solutions sont envisageables : Un électro-aimant ou un système composé d'un moto – réducteur avec une bielle – manivelle. La solution avec un électro-aimant est écartée à cause de la courbe de mouvement très brusque. Le coût augmente très vite si nous voulons arrondir cette courbe. La courbe sinusoïdale du système bielle – manivelle, quant à elle, très proche de la pulsation du cœurs et peu chère.

Pour répondre à F₂₄₁ la solution comprend donc un moto – réducteur et un système de bielle – manivelle. En étudiant la relation souple restant au tableau 13, nous avons la charge P₂₄₂ à la sortie du système bielle – manivelle est de 10 N (le coefficient de sécurité = 1,5).

S₄ permet de répondre à la fonction F₂₅ : Régler la fréquence du changement et l'amplitude du volume échangé à l'intérieur de l'endoprothèse. La solution envisagée porte sur le règlement de la vitesse de sortie du bloc moto – réducteur et la course du système bielle – manivelle. Cette solution influencera le choix du bloc moto – réducteur et modifiera le système bielle – manivelle afin d'intégrer ces fonctions.

Notre analyse continue au niveau 2 pour choisir le bloc moto – réducteur et identifier les exigences du système bielle – manivelle. A ce niveau, il y a pas de compromis à faire (pas de relations souples) donc nous n'employons pas l'ACCP. Mais au niveau 3 ,pour la définition du système bielle – manivelle, encore une fois, l'ACCP nous a permis de choisir le système 2 (Fig. 65) mieux adapté pour répondre aux exigences et optimiser le coût.

Fig.65.

Système 1

Système 2

deux cinématiques du système bielle – manivelle.

2.3.3 Définition détaillée

Cette étape consiste à paramétrer tous les éléments du banc d'essais afin d'identifier des composants standards à commander et des composants spécifiques à fabriquer.

Dans le cadre de ce rapport, nous ne présentons pas l'ensemble de l'étude. Mais une partie des calculs que nous présenterons ci-dessous retiennent notre attention. Elle porte sur les calculs de la membrane.

Le cahier des charges pour la membrane dont nous avons besoin est très décalé par rapport aux produits standards sur le marché. Le débit de 28 l/min correspond à des membranes de 60 mm (28 cm^2) de diamètre et qui tiennent jusqu'à 4 bar minimum, donc trop résistantes pour notre utilisation à 0,33 bar. L'inconvénient de ces composants est le rendement très faible à basse pression. De plus, le coût est assez élevé (***).

Il nous vient à l'idée d'utiliser la chambre à air des motos pour fabriquer nos membranes. Après quelques calculs en résistance et en fatigue, cette matière est adaptée parfaitement à cet usage. Avec un changement après chaque essai, le coût de ce composant reste encore très faible par rapport à la solution d'utilisation des membranes standards.

Avec cette nouvelle matière nous recalculons la section et la course optimales du système de membrane. En tenant compte de la flexibilité supérieure de la matière nous obtenons un rapport course/section optimal plus important : une course P_{245} égale à 12 mm pour une section moyenne P_{246} de 20 cm^2 . la réduction de section P_{246} réduit considérablement la charge P_{242} à la sortie du système de bielle – manivelle de 10N à 7N. Ce gain de 30% en charge nous a permis de continuer l'optimisation du système bielle – manivelle et du système moto – réducteur.

2.4 Rédaction des documents

Les documents techniques du banc comprennent le plan d'ensemble, la nomenclature des composants standards, les plans des pièces à fabriquer et les recommandations pour la fabrication, le montage et l'entretien. La mise à jour des tableaux de relation entre performances est nécessaire pour leur suivi. Elle permet d'évaluer les performances globales du banc et les améliorations futures.

Les guides d'utilisation destinés aux expérimentateurs consistent à proposer des protocoles de test et d'étalonnage. Avec le plan d'expériences proposé par les chercheurs, nous définissons le protocole d'expérimentation.

2.5 Remarque

Le banc d'essai est simple car son développement est basé sur une analyse claire. C'est souvent le manque de clarté, le doute dans la matérialisation du besoin, qui conduisent à un banc d'essais complexe. On installe des capteurs inutiles, on construit sur la base de performances trop élevées par crainte de ne pas répondre entièrement au besoin. Ainsi, c'est un coefficient d'incertitude, presque de sécurité qui contribue à augmenter le coût final.

L'analyse des facteurs perturbateurs doit se poursuivre pendant toute la phase de la conception. Dans ce projet, elle a permis d'écarter l'utilisation d'électro-aimant qui produit d'une part une courbe de mouvement trop brutale qui ne correspond pas au profil de la sollicitation in vivo et d'autre part une source de champs magnétique trop près du système à tester. L'inconvénient du système avec le piston que nous avons écarté est la présence d'usure, risque de charger le liquide d'abrasif. Le liquide utilisé doit être déminéralisé pour éviter le dépôt de calcaire. Etc.

La démarche a permis un délai de développement relativement court : 10 mois qui ira de l'expression du besoin à la concrétisation d'un prototype opérationnel.

Le suivi de performance jusqu'aux composants de base permet au concepteur d'améliorer le banc d'essais pour les étapes aval de la recherche dont le deuxième prototype (Fig. 66) permet la sollicitation angulaire (α de 0° à 20°) de l'endoprothèse.

Fig.66.

Un cahier des charges optimisé est encore une fois à la base de la réussite d'un projet de ce type.

3 Synthèse de la deuxième série d'expérimentations

Avec trois projets de développement des MES, cette série d'expérimentations permet de valider certains points suivants :

La démarche permet non seulement de structurer le travail collaboratif, mais aussi d'améliorer leurs échanges et d'installer la confiance entre partenaires.

L'association entre l'analyse d'expérimentation et l'analyse fonctionnel dans l'ANEXOF est réellement réussie dans l'objectif de la rédaction du cahier des charges du MES. Le concepteur peut faire intervenir l'outil d'ACCP à plusieurs reprises et à des niveaux différents dans la conception de MES. Les résultats finaux démontrent l'efficacité de ces outils. Les trois projets sont réussis dès la première fois en respectant leur budget et leur délai.

La démarche est flexible dans l'application. Elle respecte le contexte de développement et prend en compte la complexité de chaque projet :

- Dans le projet « machine d'essais de délaminage à grande vitesse de matériaux composites », nous travaillons avec le BE de la division CCR (Centre Commune de la Recherche) de chez EADS. Bien qu'ils ont une démarche de travail différent que la notre, ils n'ont aucune difficulté à s'intégrer dans le projet et nous sommes arrivés à coordonner le travail des deux côtés sans interruption.
- Dans le projet « machine de mesure psychométrique MAIN », la flexibilité de la démarche permet son intégration dans une autre démarche de conception, celle de la conception des équipements industriels. Cette association de deux démarches permet d'atteindre l'objectif final, celui de développement d'un banc d'essai - prototype de la machine de mesure psychométrique MAIN.
- Dans le projet « banc d'essais en fatigue des endoprothèses aortiques fabriquées sur mesure », la flexibilité de la démarche se trouve dans l'utilisation des outils à des niveaux d'analyse plus ou moins détaillés selon le besoin du concepteur.

La structure de la démarche s'améliore au cours des projets. Les grandes phases ne sont pas changées mais dans les étapes, nous observons des retours d'expériences intéressants. Ils permettent les améliorations nécessaires à optimiser notre démarche. Le chapitre ci-dessous présentera la version améliorée de notre démarche.

chapitre 9

Retours d'expériences – deuxième modèle de la démarche

1 Retours d'expériences.

Dans les six projets où nous utilisons l'ANEXOF, nous avons réussi à rédiger des cahiers des charges plus complets et compréhensibles que de façon conventionnelle. Mais dans les projets de la deuxième série, les éléments qui apparaissent en cours de conception de MES, risquent d'interagir avec le phénomène à étudier. C'est le cas du projet de « banc d'essais en fatigue des endoprothèses aortiques fabriquées sur mesure », et du projet de « machine d'essais de délaminage à grande vitesse de matériaux composites ». Si nous ne restons pas vigilant, le MES développé risque de ne pas fonctionner ou donner des mauvais résultats. A chaque fois qu'un nouvel élément apparaît, nous devons analyser son influence sur le phénomène à étudier. Et si cette influence se révèle effective, une fonction de contrainte doit être ajoutée dans le cahier des charges.

La leçon que nous retenons de ces expériences est que l'ANEXOF ne doit pas s'arrêter à la phase d'analyse du besoin mais elle doit se poursuivre tout le long de la conception pour contrôler la compatibilité des solutions choisis par rapport aux expérimentations prévues. Le cahier des charges évolue au fur et à mesure de l'état d'avancement du projet. C'est pour cette raison que les concepteurs et les chercheurs doivent travailler ensemble dans une relation partenaire et ne pas s'arrêter à une simple relation client – fournisseur.

Au cours du développement des projets « Maîtrise et asservissement du chariot » et « reconception d'une mini machine de traction », nous avons amélioré la pratique de l'ACCP. La présentation sous forme de tableaux de relations « critères – performances » permet aux concepteurs une vision plus claire sur les relations imbriquées, les relations multi critères qu'on rencontre très souvent en conception. Elle est plus parlante, plus facile à créer et à exploiter que les graphes que nous proposons au début.

Le mécanisme d'équilibrage de l'ACCP n'a besoin en réalité que des taux d'accroissement du rapport coût/performance des solutions. Toutes les analyses très compliquées des coûts relatives à chaque performance ne sont pas nécessaires. C'est l'un des principaux avantages de cette analyse.

Compte tenu des retours d'expériences ci-dessus, nous proposons un modèle amélioré de la démarche.

2 Deuxième modèle de la démarche.

Nous rappelons la structure du premier modèle (Fig. 67).

Fig.67.

ACCP

Besoin d'expérimentation

ANEXOF

Rédaction des documents

Dossiers du produit

Choix et Validation

CdCff

MES

Expérimentations

Recherche des solutions

Principe de la solution

Conception préliminaire

Validation des composants

Validation du concept

Définition préliminaire

Définition détaillée

Validation et étalonnage

Fabrication

Premier modèle de la démarche de conception des MES.

Compte tenu des remarques d'amélioration, le deuxième modèle de la démarche doit avoir un CdC évolutif. L'ANEXOF doit se poursuivre au cours de la conception (les phases 2, 3, 4 et 5) pour prendre en compte les nouvelles interactions liées à des solutions retenues. Plus le MES est défini en détail, plus le CdC est complet.

Fig.68.

ANEXOF

ACCP

Besoin d'expérimentation

Analyse du besoin

Rédaction des documents

Dossiers du produit

Choix et Validation

CdCF

MES

Expérimentations

Recherche des solutions

Principe de la solution

Conception préliminaire

Validation des composants

Validation du concept

Définition préliminaire

Définition détaillée

Validation et étalonnage

Fabrication

Problème de conception

Deuxième modèle de la démarche de conception des MES.

Si on compare cette démarche avec la démarche de conception des produits industriels (chapitre 3), on peut trouver trois distinctions principales :

- L'adoption de l'ANEXOF comme un outil d'analyse du besoin qui remplace la méthode d'Analyse fonctionnel
- L'enrichissement du cahier des charges en cours de développement en utilisant l'ANEXOF.
- L'utilisation de l'ACCP comme un outil d'optimisation de la conception

C'est grâce à ces trois distinctions que notre démarche peut s'adapter aux caractères spécifiques des projets de développement des MES.

Conclusion générale

1 Apports de la thèse

La nécessité de maîtriser l'innovation technologique implique une maîtrise du processus de la recherche et développement. Dans ce processus, le développement des ME est le pont qui relie les connaissances scientifiques avec les avancées techniques. Cette thèse est réalisée dans l'intention d'apporter une pierre pour renforcer ce pont. Elle permet d'abord de constater certains dysfonctionnements du développement des MES, à la base de notre problématique. Ensuite, elle propose une solution pour y palier sous forme d'une démarche de conception intégrant deux outils méthodologiques nouveaux. Les projets d'application de la démarche sont les tests de validation qui démontrent la pertinence de la démarche proposée.

1.1 Révéler la problématique du développement des MES

Cette thèse a commencé dans un contexte très concret. Les projets de développement des MES au sein du laboratoire Prototypes de l'ENSAM rencontrent des difficultés et les résultats ne sont pas satisfaisants. Après une analyse de plusieurs projets puis une enquête auprès d'autres laboratoires de recherche en France, nous arrivons à une conclusion que ces difficultés sont courantes dans beaucoup de laboratoires et dans beaucoup de domaines de la recherche.

C'est la première fois que les Moyens d'Expérimentation sont considérés comme une catégorie de produits à part. Jusqu'à maintenant ils étaient classés dans la catégorie des équipements industriels ; notre étude permet de révéler les caractéristiques particulières qui les différencient de ces produits industriels. Les études portant sur leur contexte de développement, leur domaine d'utilisation et leur position dans un projet de recherche et développement démontrent leur complexité et leur diversité. Du point de vue méthodologique, ces caractères sont à l'origine des difficultés à trouver leur véritable identité.

Nos analyses qui portent sur des projets de développement de MES et notre enquête que nous avons réalisé auprès de vingt et un laboratoires soulèvent des points communs dans le développement de MES. Elles permettent d'identifier la problématique de notre recherche dont les conclusions sont les suivantes :

- Les difficultés majeures rencontrées en cours de développement des MES sont liées, d'une part à un manque d'expériences dans le rassemblement des connaissances scientifiques et techniques nécessaires au développement des MES, d'autre part à une absence de démarche qui permet de structurer le travail de l'équipe en respectant les contextes du laboratoire et du projet.
- L'origine de tous les insatisfactions des chercheurs relatives aux MES développés sont liées à la mauvaise analyse du besoin. La traduction du besoin au cahier des charges n'est pas toujours fidèle à son origine. Les cahiers des charges sont souvent incomplets et imprécis.
- La contrainte économique est une des contraintes qui freinent l'avancement de la recherche. Elle se manifeste sous forme de manque de moyens d'essais performants pour réaliser les expérimentations : principaux vecteurs de l'avancement de la recherche. L'optimisation du rapport coût – performance des MES est une nécessité pour palier cette contrainte.

Cette révélation nous encourage à chercher une solution commune à la résolution des problèmes du développement des MES.

1.2 Proposition d'une démarche de conception dédiée au développement des MES

Après une étude bibliographique dans le domaine méthodologique en conception de produits, nous ne trouvons pas d'études sur la conception des MES. Les méthodes de conception existantes ne sont pas très adaptés aux produits unitaires comme les MES et encore moins à leur spécificités.

C'est pour ces raisons que nous proposons une démarche de conception spécifique dédiée au développement des MES.

La démarche est basée sur le processus de conception en 4 phases que nous adaptons au développement des MES en prenant en compte leurs caractères spécifiques :

- Le développement des MES est unitaire ce qui place la fabrication du produit définitif juste après la conception. L'absence de phase « prototype » impose une vérification de nos décisions à chaque étape. Cette précaution évite les reconceptions successives.
- Ce sont souvent des petits projets dont les moyens humains et matériels sont partagés avec d'autres projets. Les membres de l'équipe – projet sont éparpillés dans différents secteurs, différents établissements. Nous avons organisé le planning de travail en jalonnant et en synchronisant les tâches pour s'adapter à ce contexte.
- Les différents niveaux de complexité du projet ont conduit au caractère flexible de notre démarche.

Plus qu'une adaptation, notre démarche s'est efforcée de résoudre les difficultés rencontrées au cours du développement des MES et d'optimiser leur conception en terme de coût et de performances. Les deux outils méthodologiques, ANEXOF et ACCP, que nous avons développés ont permis d'atteindre ces objectifs.

Elle a démontré son efficacité dans différents contextes de développement, de l'amélioration des MES existants au développement des MES nouveaux. Dans une dizaine de projets que nous exploitons pour expérimenter la démarche, nous avons obtenu des résultats très satisfaisants.

Au-delà d'un meilleur dialogue, la démarche a permis d'établir une confiance réciproque et de proposer un fil conducteur pertinent pour le travail en commun. Sa simplicité d'application la rend adaptable au contexte des laboratoires de recherche.

Cette démarche permet une meilleure prise en compte de la dimension économique car elle permet d'aboutir non seulement sur un MES bon du premier coup mais également sur une conception optimisée en terme de coût. Elle permet une meilleure cohérence entre le budget disponible et la cible visée en terme d'avancées scientifiques. En associant l'ACCP avec l'ANEXOF, nous pouvons obtenir une meilleure cohérence entre le budget et l'avancement de la recherche.

1.3 Développement d'un outil méthodologique qui relie les connaissances scientifiques et technologiques au service du développement des MES

L'utilisation de l'ANEXOF a permis de rassembler et de structurer, autour des sujets à traiter, les connaissances scientifiques et techniques. C'est le couplage du besoin en expérimentation et du besoin en moyen d'expérimentation qui les relient. Notre outil est une association de deux analyses du besoin : l'analyse du besoin expérimental des chercheurs et l'analyse fonctionnel des concepteurs.

La pertinence de l'outil réside dans la définition de la performance des fonctions issue d'une traduction des paramètres scientifiques intrinsèques à l'expérimentation. Il faut rappeler, qu'ici, c'est l'expérimentation et non pas le MES qui est placé au cœur de l'analyse. C'est l'expérimentation qu'on doit optimiser à travers un développement adapté du MES.

La prise en compte des interactions qui permet l'évolution du CdCF au cours de la conception est une garantie de la réussite du projet. Elle permet au chercheur de contrôler le développement des MES et en même temps de mieux connaître les limites d'utilisation de celui-ci.

Cet outil permet aux chercheurs et aux concepteurs de construire un langage commun qui leur permet de mieux communiquer. L'outil permet de structurer et d'optimiser au « juste nécessaire » leurs échanges de connaissances et d'expériences pour le développement du MES.

1.4 Développement d'un outil d'optimisation de la performance et du coût dans la conception des MES

L'adoption de la notion de « cohérence en coût – performance » permet une complémentarité par rapport à la notion de « valeur » que nous connaissions jusqu'à maintenant.

L'analyse de la cohérence en coût – performance (ACCP) est une démarche d'optimisation. Elle permet une meilleure répartition du coût des performances locales en respectant les performances globales. En s'appuyant sur l'analyse des relations entre les performances locales et les paramètres de « rapport d'accroissement coût – performance » nous équilibrons la répartition des charges de la performance globale aux performances locales associées.

L'ACCP comporte deux mécanismes qui sont adaptés à deux phases de la conception :

- L'Analyse de la cohérence générique est utilisée dans la phase descendante de la conception qui va de la fonction aux solutions
- L'Analyse de la cohérence affinée est utilisée dans la phase ascendante de la conception qui sert à la validation de la solution choisie.

L'ACCP peut être utilisée à plusieurs niveaux dans le processus de conception, aussi bien pour la préconception, la conception détaillée, que pour les processus de fabrication.

L'analyse de la cohérence en coût – performance est un outil pluridisciplinaire. Elle ne s'appuie pas sur les caractères particuliers des MES ; elle ne limite donc pas son champ d'application au développement des MES mais dans tous les secteurs d'activité où les notions de performances locales et globales sont présentes.

Elle est particulièrement adaptée aux produits qui ne peuvent pas bénéficier d'un retour d'expérience. Les produits unitaires ou fabriqués en petites séries, les machines spéciales, les équipements d'expérimentation font partie de cette famille. Elle est d'autant plus pertinente que le niveau technologique est élevé.

2 Limite de notre étude

Bien que notre démarche est dédiée au développement des MES en général, il faut prendre en compte que les expérimentations de la démarche sont limitées aux MES à dominante mécanique. Nous ne pouvons, pour l'instant pas la généraliser à tous types de MES.

Nous ne pouvons pas valider l'évolution vers le deuxième modèle de la démarche qui n'a pas été validé. Dans la mesure où le nombre d'expérimentations du premier modèle est relativement peu important (10 projets), il est vraisemblable que d'autres améliorations seront souhaitables.

L'outil de l'Analyse de la Cohérence en Coût-Performance est pour l'instant développé à un niveau expérimental. Cette approche pragmatique est relativement simple et pertinente, mais son application devient rapidement complexe pour des produits où les interférences sont nombreuses. Une approche mathématique de l'ACCP pour des projets complexes est donc nécessaire.

Compte tenu du besoin exprimé dans la problématique et des difficultés rencontrées au cours de l'application de la démarche, la capitalisation des savoir-faire et des connaissances acquises, aujourd'hui non formalisée dans notre démarche, est nécessaire pendant toute la phase de conception des MES. Cette capitalisation permettra :

- d'enrichir les connaissances scientifiques sur l'environnement du domaine de la recherche concernée.
- de capitaliser les savoir-faire dans le développement des MES sous forme de bibliothèque de solutions adaptées aux problèmes couramment rencontrés.

Les limites de l'étude permettent d'identifier les voies de développement futur de ce travail de thèse.

3 Perspectives

Les applications de la démarche réalisées dans le cadre du développement des MES à dominante mécanique démontrent sa pertinence. Afin de généraliser son apport, il est nécessaire de l'expérimenter dans d'autres domaines. Ces expérimentations nouvelles permettront entre autre d'enrichir nos savoir-faire et d'améliorer notre démarche.

Les modélisations des relations dans l'ACCP par des modèles mathématiques constituent une voie de développement importante. Elles permettront de développer un support logiciel qui augmentera la performance de cet outil. Performance qui sera alors renforcée par une possible intégration des outils de calculs « métiers » et des critères multidisciplinaires.

L'ACCP est un outil méthodologique pluridisciplinaire qui comme l'Analyse de la Valeur peut vraisemblablement être appliqué au développement d'autres produits que les MES. Des expérimentations dans ce but permettront probablement d'en améliorer les performances. Cet outil d'aide à la conception pourrait alors, après adaptation, être utilisé, comme outil d'optimisation dans les phases amont et aval du processus de conception des produits et des procédés.

Une capitalisation de connaissances basées sur les expériences en développement des MES permettra de fournir des solutions adéquates à chaque problème couramment rencontré.

La création d'une base de données qui permet l'identification des milieux extérieurs et interactions spécifiques à chaque domaine d'activité de la recherche sera un atout pour faciliter l'ANEXOF. Elle permettra non seulement d'accélérer le travail d'analyse mais surtout d'assurer une analyse plus complète grâce à un travail d'anticipation sur les éventuelles interactions.

Grâce aux outils « ANEXOF » et « ACCP », et à l'exploitation d'outils existants la démarche a déjà fait ses preuves dans le développement de Moyens d'Expérimentation relativement simple. Les perspectives de développement ouvrent la voie vers des projets plus complexes, dans des domaines différents de la mécanique. Il faudra, toutefois, dans le contexte des laboratoires veiller à préserver la simplicité d'application de notre méthode.

Bibliographie

- [ABT 00] ABT Laurent, MARTIN Patrick, LOSSENT Luc, « Méthodologie de validation de cahier des charges, cas de la réalisation de machines spéciales », IDMME 2000.
- [ADAMS 97] ADAMS R.D., COMYN J. & WAKE W.C., « Structural adhesives joints in engineering », Chapman & Hall, 2ème édition. 1997.
- [AFAV 89] AFAV - Association Française pour l'Analyse de la Valeur, « Exprimer le besoin – Application de la démarche fonctionnelle » ; Edition AFNOR ; 1989.
- [AFAV www] AFAV - Association Française pour l'Analyse de la Valeur, « La Valeur », revue d'information sur l'Analyse de la Valeur, <http://www.afav.asso.fr>.
- [AFAV 97] AFAV – Association Française pour l'Analyse de la Valeur, « Qualité en Conception - La rencontre Produit -Besoin – Ressources », Édition AFNOR Gestion 1997.
- [AFITEP 98a] « Vocabulaire de gestion de projet » ; Les dossiers de la normalisation AFITEP ; Edition AFNOR ; 1998.
- [AFITEP 98b] « Management de projet : principes et pratique », 2ème édition d'AFNOR, Paris 1998.
- [AHLSTRÖM 01] AHLSTRÖM L.M., KJELLBERG A. et SOHLENIUS G., « Principles and experiences concerning sustainability in product realisation », QMOD 2001.
- [AKAO 93] AKAO Yoji ; « QFD – Prendre en compte les besoins du client dans la conception du produit » ; Edition AFNOR ; 1993.
- [ALEXIS 95] ALEXIS Jacques, « Pratique industrielle de la méthode TAGUCHI – Les plans d'expériences », Edition AFNOR, 1995
- [ANDREASEN 83] ANDREASEN M.M., KAHLER S. LUND T., « Design for assembly », édition IFS and springer-Verlag Berlin, 189 pages, 1983.

- [ANTONY 98] ANTONY J. et ANTONY F.J. ; « Teaching Advanced Statistical Techniques to Industrial Engineers and Business Managers »; journal of Engineering Design; Vol. 9; N° 1; CARFAX Publishing 1998.
- [AOUSSAT 90] AOUSSAT Améziane, « La pertinence en innovation; nécessité une approche plurielle », Thèse de doctorat, laboratoire de Conception de Produit Nouveaux, ENSAM, 1990.
- [AOUSSAT 98] AOUSSAT A.; « Contribution à la modélisation du processus de conception de produits industriels » ; Rapport de l'Habilitation à Diriger des Recherches ; INPG ; 1998.
- [ARCAN 78] ARCAN M., HASHIN Z., VOLOSHIN A., "A method to produce Uniform Plane Stress States with applications to Fiber-Reinforced Materials", Experimental mechanics, Vol. 18, n° 2, p. 141-146, 1978.
- [ARCAN 87] ARCAN L., ARCAN M. & DANIEL I., "SEM fractography of pure and mixed mode interlaminar fracture in graphite/epoxy composites", ASTM Special Tech. Publ., 948, 41-67, 1987.
- [AUBLIN 99] AUBLIN Michel, CHARPANTIER Alain, DELOBEL Jean-Pierre, LEROUX Benoît, MURET Claude et TAREAUD Dominique, « Exploitation du concept G.P.S et de la normalisation pour la Spécification Géométrique des Produits », Ministère de l'Education National, de la Recherche et de la Technologie, CERPET, 1999.
- [BADIRU 96] BADIRU Adedeji B., "Project Management for Research A guide for engineering and science", School of Industrial Engineering, University of Oklahoma, USA, edition Chapman & Hall, UK, 1996.
- [BARLIER 95] BARLIER et al., « Conception en mécanique industrielle : Calculs, Agencement, Prototypages », Tome 1 à 4, Mise à jour permanente, Edition DUNOD, 1995.
- [BENOIST 94] BENOIST Daniel, TOURBIER Yves et GERMAIN-TOURBIER Sandrine, « Plans d'expériences : Construction et Analyse », Edition Lavoisier TEC&DOC, 1994.
- [BERNARD 66] BERNARD Claude, « Introduction à la médecine expérimentale », réédition, Edition Garnier-Flammarion, Paris 1966.
- [BERRAH 02] BERRAH Lamia ; « L'indicateur de performance » ; Collection « Concepts et applications » ; Edition Cépadués ; 2002.
- [BOCQUET 94] BOCQUET Jean-Claude, CALISTE Jean-François et LOUVET François ; « Adopter une démarche de conception » ; Chapitre 3.2 dans « Conception en mécanique industrielle » sous la direction de Claude BARLIER ; Edition DUNOD ; mise à jour permanente.
- [BOOTHROYD 83] BOOTHROYD Geoffrey, « design for assembly », édition AMHERST, University of Massachusetts. Department of Mechanical Engineering, 77 pages, 1983.

[BOOTHROYD 94] BOOTHROYD, Geoffrey, DEWHURST P. KNIGHT W. « Product design for manufacture and assembly », Edition Marcel Dekker, 540 pages, 1994.

[BORJA 90] BORJA de MOZOTA Brigitte, « Design et management », Edition d'Organisation, Paris, 1990.

[BOROUCHAKI 00] BOROUCHAKI Houman, LAFON Pascal et VILLON Pierre, "Surface à variation minimale et maillages réguliers", Analyse Numérique, Éditions Scientifiques et médicales ELSEVIER, C.R. Académie des sciences, t 331, Série 1, pages 479-484, 2000.

[BOULHARTS 97] BOULHARTS-CAMPION Habiba, Jean-Louis BILLOET, J. LE ROUZIC, « Loi de comportement homogénéisée d'un câble à fibres optiques composite multicouche pour la simulation du poussage en zone urbaine », AUM, Poitiers, 13ème congrès Française de mécanique, 1997, Vol 2, Pages 29-32.

[BOULHARTS 98] BOULHARTS-CAMPION Habiba, « Etudes expérimentale et numérique de la pose par poussage d'un câble composite à fibres optiques dans un conduite », Thèse doctorat en mécanique, ENSAM Paris, 1998

[BRAIBANT 85] BRAIBANT V. et FLEURY C.; "An approximation-concepts approach to shape optimal design"; Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 53, Issue 2, pages 119-148, November 1985.

[BRIME 97] « L'ingénierie centrée sur l'Homme ou la prise en compte des facteurs humains dès les premières phases de la conception », BRIME, Direction générale des stratégies industrielles, Edition du Ministère de l'industrie des postes et des télécommunications, 1997.

[BRISAUD 97] BRISAUD Daniel, « Contribution à la modélisation des processus d'usinage dans un contexte de conception intégrée des produits », rapport d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Joseph-Fourier, Grenoble I, 1997

[CARFANTAN 02] CARFANTAN S. « Philosophie et spiritualité » leçon 30 « De l'expérience à l'expérimentation » , 2002.

[CAZAUBON 97] CAZAUBON Christian, GRAMACIA Gino, MASSARD Gérard, « Management de projet technique – Méthodes et outils », collection TECHNOSUP, Edition ELLIPSES, 1997.

[CHAL 94] CHAL Jan., REDFORD, Alan Harry, « Design for assembly : principles and practice », Edition McGraw-Hill London, 240 pages, 1994.

[CHALMET 98] CHALMET J. L., BARON M., BONNECASE D., MAUCOTEL J. M., TABOURIN D., TRIFT O. ; « Guide pratique du responsable bureau d'études » ; Edition WEKA ; 1998.

[CHEIKH 01] CHEIKH M, COOREVITS P & LOREDO A, "Modelling the stress vector continuity at the interface of bonded joints", Int. J. Adhesion & Adhesives, 22, 249-257, 2001.

- [CHERFI 02] CHERFI Zohra, « La qualité : démarche, méthodes et outils », Collection « Traité IC2 Information, commande, communication, Série Systèmes automatisés », Claude FOULARD, Edition Hermès Science publication, Paris, 2002.
- [CHVIDCHENKO 94] CHVIDCHENKO I., CHEVALLIER, J., « Conduite et gestion de projets : principes et pratiques pour petits et grands projets », Edition Cépadués Toulouse, 1994.
- [CISAD 01] « Recherche et développement en France – Résultat 2000, estimation 2001 », Publication du ministère de l'éducation nationale, <http://cisad.adc.education.fr/reperes/public/chiffres>.
- [COGNARD 02] COGNARD J.Y., DAVIES P. et GINESTE B., « Conception et optimisation d'assemblages collés pour structures sous-marines en composites », 4ème Conférence internationale sur la conception et la fabrication intégrée en mécanique, cdrom, 2002.
- [COLIN 88] COLIN C., « Design Aujourd'hui », Centre national des arts plastiques, Edition Flammarion, Paris, 1988.
- [COLLIER 03] COLLIER V. et COUROUL J.; « Mise en œuvre du banc d'essai MACHA » ; rapport d'avancement du projet ; encadrement TUORON M. ; Laboratoire d'automatisme de l'ENSAM ; 2003.
- [DAVIES 03] DAVIES P. & SARGENT J.P., "Fracture mechanics tests to characterize bonded glass/epoxy composites: application to strength prediction in structural assemblies", Proc. 3ème ESIS, 2003.
- [DEKETELE 96] DE KETELE Jean – Marie, ROEGIERS Xavier, « Méthodologie du recueil d'informations – Fondements des méthodes d'observations, de questionnaires, d'interviews et d'études de documents », 3ème édition De Boeck Université, 1996.
- [DELAFOLLIE 91] DELAFOLLIE Gérard ; « Analyse de la Valeur » ; Edition HACHETTE Technique ; 1991.
- [DELAFOLLIE 98] DELAFOLLIE G., TEXIDO Ch.- « Les outils d'analyses initiales de conception » ; Conception en mécanique industrielle ; Edition Les Référentielle Dunod ; Chapitre 3.9, 1998.
- [DEMONSANT 96] DEMONSANT Jacques, « Comprendre et mener des plans d'expériences », Edition AFNOR, 1996.
- [DENEUX 02] DENEUX Dominique ; « Méthodes et modèles pour la conception concourante » ; rapport de l'Habilitation à Diriger des Recherches ; Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis ; 2002.
- [DO 00] DO, S.H., et SUH N. P. « Axiomatic Design of Software Systems » Annal CIRP, Vol. 49, N° 1, 2000.
- [DONNARUMMA 02] DONNARUMMA A. et al., « Measure of independence in soft design », Journal of Materials processing technology, N° 124, 2002.

- [DORMEGNIE 01] DORMEGNIE D., "Contribution à l'étude de loi de similitude applicables au crash de structures composites stratifiées du type absorbeur d'énergie », Thèse de doctorat à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2001.
- [DORTIER 00] DORTIER Jean-François, « Qu'est ce qu'un chercheur », Journal Histoire et Philosophie des sciences », Hors série N° 31, Décembre 2000.
- [DOSSIN 99] DOSSIN Dominique et GIRAUD Tony, « Flambement de plaques sandwichs », PFE sous la direction de THOUROT, PHILIPES et de TOURATIER, Laboratoire LMS de l'ENSAM, 1999.
- [DOUMEINGTS 92] DOUMEINGTS G. « Evaluer pour Evoluer », extrait des travaux de l'AFGI, 1992.
- [DROESBEKE 97] DROESBEKE Jean-Jacques, FINE Jeanne, SAPORTA Gilbert - éditeurs, « Plans d'expériences applications à l'entreprise », Edition TECHNIP, 1997.
- [ERTAS&JONES 94] ERTAS A. et JONES J.C., « The engineering design process », Edition John Wiley & son, Texas USA, 1994
- [FIM 00] Fédération des Industries Mécaniques, "Industries mécaniques - enquête sur les dépenses de recherche des PMI entre 1988 et 1998", Direction des questions techniques Ph.D/vt-045; Mécanique Industrielle N°1, pages 117 - 119; Éditions scientifiques et médicales ELSEVIER, 2000.
- [FINKELSTEIN 95] FINKELSTEIN A.C. et FINKELSTEIN L. ; « Review of design methodology » ; Design and Systems par W.W. GASPARSKI, Transaction publishers; 1995.
- [FISCHER 89] FISCHER M. & PASQUIER M., "Shear behaviour of structural adhesives in the bondline", Construction & Building Materials, 3, 31-34, 1989.
- [FOWLKES 98] FOWLKES William Y. et CREVELING Clyde M., « L'ingénierie robuste _ Méthodes TAGUCHI en conception », Institut RENAULT, version française, Edition DUNOD, 1998
- [FRANCASTEL 99] FRANCASTEL Jean-Claude, « La fonction maintenance – De l'expression à la satisfaction du besoin », Edition AFNOR, 1999.
- [FUSSLER 96] FUSSLER C. et JAMES P., « Driving eco-innovation : a breakthrough discipline for innovation and sustainability », edition PITMAN London, 1996.
- [GABRIEL 99] GABRIEL Marc ; « La maintenance en conception » ; Conception en mécanique industrielle par Les référentiels DUNOD ; 1999.
- [GAUSS 95] GAUSS D.C. et MINCH E. ; « Design processes : A state space Perspective » ; Design and Systems par W.W. GASPARSKI, Transaction publishers; 1995
- [GINESTE 93] GINESTE B., « Assemblage de structures en matériaux composites par stratification d'un élément de liaison, caractérisation de l'endommagement », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 1993.

- [GONCALVES 02] GONCALVES J.P., MOURA M.F, & DE CASTRO P.M., A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints, Int. J. Adhesion et Adhesives, 22, 357-365, 2002.
- [GOUPY 01] Jacques GOUPY, « Introduction aux plans d'expériences », 2èmes édition, DUNOD, 2001.
- [GOUPY 99] GOUPY Jacques, « Plans d'expériences pour surfaces de réponse », edition DUNOD, 1999.
- [GRASS 98] GRASS Philippe et TOUSSAINT Christophe, « Etude du flambement de plaques sandwichs » ; PFE sous la direction de THOUROT et de TOURATIER, Laboratoire LMS de l'ENSAM, 1998.
- [GRASSWILL 99] GRASSWILL Dimitri et MICHAUT Benoît, « Conception d'un banc de flambement avec frottement conditionnée de poutres composites et modélisation par éléments finis », Projet de fin d'études sous la direction de Mohamed HABOUSSI, ENSAM Paris, 1999
- [HAIGNERE 02] Claudie HAIGNERE « conférence de presse le 25 septembre 2002 ».
- [HINTERSTEINER 99] HINTERSTEINER Jason D., « A Fractal Representation for systems », CIRP, 1999.
- [HOUGRON 03] HOUGRON Thierry ; « Le pilotage de la valeur – Les 77 règles pour concevoir, produire et vendre mieux » ; collection de l'Usine Nouvelle ; Edition DUNOD ; 2003
- [HUANG 96] HUANG G.Q. « Design for X – Concurrent engineering imperatives »; Edition CHAPMAN&HALL; 1996.
- [HUISMAN 71] HUISMAN D. et PATRIX G., « L'Esthétique industrielle », Collection que sais-je ? Edition PUF, Paris, 1971.
- [HUNG 97] HUNG S. C., LEICHTI K.M., "An Evaluation of the ARCAN Specimen for determining the shear moduli of fiber-reinforced composites", Experimental mechanics, Vol. 37, n° 4, p. 460-468, 1997.
- [HUNG 97] HUNG S. C., LEICHTI K.M., "Finite element analysis of the ARCAN Specimen for fiber-reinforced composites under pure shear and biaxial loading", Journal of composites materials, Vol. 33, n° 14, p. 1288-1317, 1999.
- [JACKSON 89] JACKSON C., MELLOR J. E. and GEARY G. M.; "Hierarchical CIM networking"; Computer Integrated Manufacturing Systems, Volume 2, Issue 4, November 1989, Pages 207-213
- [JAGOU 93] JAGOU Patrick ; « Concurrent Engineering – La maîtrise des coûts, des délais et de la qualité » ; collection Systèmes d'Information ; Edition HERMES ; 1993.
- [JANSSEN 90] JANSSEN « Aide à la conception : une approche basée sur la satisfaction de contraintes », Rapport de thèse, Université de Montpellier II, 1990.

- [JUSE 93] JUSE « TQC – Les 14 étapes du processus » ; Edition AFNOR, 1993.
- [KIM 04] KIM, S.G., « Axiomatic Design of Multiscale Systems », 3ème International Conference on Axiomatic Design, Seoul, Korea, 2004.
- [KIM 91] KIM S.J., SUH N.P., KIM S.G., « Design of software system based on axiomatic design », CIRP N° 40, pages 165-170, 1991.
- [KUSIAK 92] KUSIAK A. et SZCZERBICKI E. « A Formal Approach to Specifications in Conceptual Design », Journal of Mechanical Design, N° 114, pages 659–666, 1992.
- [LANDY 02] LANDY Gérard, « AMDEC – Guide pratique », Edition AFNOR, 2002.
- [LANGRAND 03] LANGRAND B., FABIS F., DEUDON A., MORTIER J-M., « Détermination expérimentale du comportement mécanique et de critère de rupture d’assemblages sous chargements mixtes », Mécanique et Industries, Vol. 4, n° 3, 2003.
- [LE COQ 92] LE COQ Marc, « Approche intégrative en conception de produits », thèse de doctorat, Laboratoire de Conception de Produits Nouveaux, ENSAM, 1992.
- [LEGENDRE 97] M. LEGENDRE ; « Plan d’expériences » ; cours de 2ème année de l’ISMCM – Paris ; 1997-1998
- [LEMOIGNE 90] LEMOIGNE Jean-Louis, « La théorie du système général », Edition P.U.F. 1990.
- [Les grands chiffrés 00] « Les grands chiffrés » ; publication du ministère de l’éducation nationale, de la recherche et de la technologie ; www.recherche.gouv.fr/recherche/finance; 2000
- [LIMAYEM 00] LIMAYEM F. , YANNOU B., « La méthode SPEC : une modélisation détaillée du Cahier des Charges Fonctionnel pour un suivi de projet et une maîtrise des risques » Congrès international AFAV 2000 : « Les hommes et le management par la valeur », pages 88-97, Paris, 2000.
- [LOCH 99] LOCH Christoph H. & TERWIESCH Christian; “Product Development and Concurrent Engineering”; Encyclopedia of Production and Manufacturing Management; Edition Swamidass P.M.; 1999.
- [LONCHAMPT 04] LONCHAMPT Pierre, « Co-évolution et processus de conception intégrée de produits : Modèle et support de l’activité de conception », Rapport de thèse doctorat à l’INPG, Directeurs de thèses :BRISAUD et PRUDHOMME, 2004.
- [LOSSENT 00] LOSSENT Luc, MARTIN Patrick, « Une aide à la conduite d’études de faisabilité de systèmes de fabrication », 3^{ème} International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Presses Universitaires Polytechniques – Montreal, mai 2000.

- [LOSSENT 02] LOSSENT Luc, MARTIN Patrick, ROSE Bertrand, « Methodology for a development of specifications in a dynamic design process: application to special machines », IEEE SMC'02 Tunisie 2002.
- [LOSSENT 97] LOSSENT Luc, « Contribution à la conduite d'étude de faisabilité de systèmes de fabrication », Thèse de doctorat sous la direction de MARTIN Patrick, Nancy I, 1997.
- [LUONG 01a] LUONG Thi Hong Lien; « Dossier de l'enquête sur l'état de l'art du développement des Moyens d'expérimentations » réalisé en 2001
- [MARMUSE 97] MARMUSE Christian ; « Performance » ; pages 2194 - 2208 « Encyclopédie de gestion » sous la direction de Yves SIMON et Patrick JOFFRE ; deuxième édition ; ECONOMICA ; 1997.
- [MARTIN 04] MARTIN Patrick, LOSSENT Luc, ABT Laurent et BRASSET Frédéric, « Conception de machines spéciales : méthodologie d'élaboration de cahier des charges », Journal de Mécanique & Industries Vol. 5, N° 3, pages 305-316, 2004.
- [MILLET 03] MILLET Dominique, « Intégration de l'environnement en conception : l'entreprise et le développement durable », Edition Hermès science publications, Paris, 2003.
- [MITTAL 90] MITTAL S. et FALKENHAINER B. « Dynamic Constraint Satisfaction Problems" In 8th National Conference of Artificial Intelligence, pages 25–32, Boston, MA, 1990.
- [NADLER 95] NADLER G. ; « Systems methodology and design » ; Design and Systems par W.W. GASPARSKI, Transaction publishers; 1995
- [NAKAZAWA 84] NAKAZAWA H. et SUH N.P., « Process planning based on information concept", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 1, Issue 1 , Pages 115-123, 1984.
- [NEON 98] NEON N., « Mécanismes de rupture de l'interface implant ciment des tiges fémorales », thèse de l'université de Nantes, 1998.
- [NF X 50-150 153] Normes Françaises – « Analyse de la valeur, Analyse Fonctionnelle » ; NF X 50-151 ; NF X 50-152 ; NF X 50-153
- [NF X 50-155] Norme Française - « Le management de projet-Concepts », NF X 50-105
- [NGAI KHEONG 04] NGAI KHEONG Ng., JIAO Jianxin, « A domain-based reference model for the conceptualization of factory loading allocation problems in multi-site manufacturing supply chains », Technovation Vol. 24 N° 8, pages 631-642, 2004.
- [O'SULLIVAN 98] O'SULLIVAN B. et BOWEN J. « A Constraint based Approach to Supporting Conceptual Design » Artificial Intelligence in Design '98, pages 291–308, Instituto Superior Técnico, Lisbon, 1998.

- [OLF xx] Office de la Langue Française ; « Grande dictionnaire terminologique » mise à jour permanent ; www.granddictionnaire.com
- [OSBORNE 96] OSBORNE Deborah M. et ARMACOST Robert L., « Review of techniques for optimizing multiple quality characteristics in product development », Computers in engineering Vol. 31 N° ½, Pages 107-110, 1996.
- [PAHL 84] PAHL G. BEITZ W., WALLACE K., « Engineering design », édition Design council, London, 1984.
- [PAHL&BEITZ 96] PAHL G. & BEITZ W. « Engineering Design – A systematic Approach »; Edition Springer; 1996.
- [PECHT 95] PECHT M., « Product reliability, maintainability and supportability handbook », Edition Boca Raton, USA, 1995.
- [PENADO 00] PENADO F.E., “Analysis of singular regions in bonded joints”, Int. J. Fracture, 105, 1-25, 2000.
- [PETIT 96] PETIT Valérie et François-Pierre VERPOIX, « simulation de poussage de câbles à fibres optiques », Projet de fin d’études sous la direction de Jean-Louis BILLOET, ENSAM Paris, 1996.
- [PICARD 02] PICARD G. ; « étude du comportement en dynamique d’endoprothèses aortiques faites sur mesure par les chirurgiens » ; DEA en Biomécanique ENSAM ; 2002
- [PILLET 97] PILLET Maurice, « Les plans d’expériences par la méthode TAGUCHI », Les éditions d’organisation, 1997.
- [PRUVOT 93] PRUVOT François; « Conception et calcul des machines-outils » ; Volume 1 « Généralités, Morphologie, Plan général » ; Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes ; première édition, 1993.
- [RATIER 98] RATIER Corinne ; « Conseils pour mener une enquête par questionnaire » ; version 1.1 du bureau qualité de Délégation aux Systèmes d’Information – CNRS ; 03/06/1998.
- [REVOIL 95] REVOIL Gilles ; « Assurance qualité dans les laboratoires d’analyses et d’essais », Edition AFNOR, 1995.
- [RIOUT 92] RIOUT Jacques ; « Enquête auprès des constructeurs de machines-outils » ; publié dans « L’AMDEC – un atout pour les PMI » ; Recueil de conférences 14 avril 1992
- [RIVIERRE 00] RIVIERRE Laurent ; « Flambement de poutres et conditionnement aux limites : approches analytique, numérique et expérimentale » ; Thèse de doctoral ENSAM – Paris ; 2000.
- [ROSNAY 75] Joël de ROSNAY ; « Le macroscope » ; Seuil ; 1975.

- [ROUSSEL 96] ROUSSEL Benoit, « Ergonomie en conception de produits. Proposition d'une méthode centrée sur la formulation de principes de solutions ergonomiques dans le processus de conception de produits », rapport de thèse de doctorat sous la direction de DUCHAMP Robert, laboratoire CPN, ENSAM, 1996.
- [ROZYCKI 00] ROZYCKI P., « Contribution au développement des lois de comportement pour matériaux composites soumis à l'impact », Thèse de doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2000.
- [RUDOLPH 83] RUDOLPH S. PARISSH; "On an integrated approach to member selection and parameter estimation for Pearson distributions"; Computational Statistics & Data Analysis, Volume 1, March 1983, Pages 239-255
- [SADO 00] SADO Gilles et SADO Marie-Christine, « Les plans d'expériences – De l'expérimentation à l'assurance qualité », nouvelle édition AFNOR, 2000.
- [SAUVAGNARGUES 00] SAUVAGNARGUES A., « l'expérimentation », leçon de philosophie publiée par l'ENS de Fontenay et l'ENS-LSH de Lyon sur site <http://www.cerphi.net/lec/lec.htm>. 2000.
- [SCHIMMERLING 98] SCHIMMERLING Paul, SISSON Jean-Claude, ZAÏDI Ali, « Pratique des plans d'expériences », Lavoisier TEC &DOC, 1998.
- [SHAKERI 98] SHAKERI C., BROWN D. C. et NOORI M. N. « Discovering Methodologies for Integrated Product Design », "Artificial Intelligence and Manufacturing: Second Bi-annual AI & Mfg Workshop, Albuquerque, New Mexico. 1998.
- [SOHIER 03] SOHIER L., GINESTE B., DAVIES P. & COGNARD J.Y, « Conception et évaluation d'assemblages collés de composites », 13ème Journées Nationales sur les Composites, 215-227, 2003.
- [SOHLENIUS 92] SOHLENIUS, G., « Concurrent engineering », CIRP Annals manufacturing technology, Vol. 41/2, Pages 645-655. 1992.
- [SUH 90] SUH Nam P., "The principles of design", Edition OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1990.
- [SWIFT 82] SWIFT K., « Design for optimum assembly cost » Revue Engineering , pages 560-563, août, 1982.
- [TAGUCHI 00] TAGUCHI G.; CHOWDHURY S. ; TAGUCHI S. ; « Robust engineering » ; American Supplier Institute; édition McGraw – Hill; 2000.
- [TAGUCHI 84] TAGUCHI G. et PHADKE M.S., « Quality engineering through design optimisation », Global Telecommunications Conference Edition IEEE, Atlanta, GA, 1984.
- [TARONDEAU 94] TARONDEAU Jean-Claude; "Recherche et développement » ; collection Gestion ; Edition VUIBERT ; 1994.

- [TEIXIDO 98] TEIXIDO Christian, « L'analyse fonctionnelle » ; Chapitre 3.9.2 dans « Conception en mécanique industrielle » sous la direction de Claude BARLIER ; Edition DUNOD ; 1998
- [TONG 99] TONG L. & STEVEN G.P, "Analysis and design of structural bonded joints", Kluwer, 1999.
- [VADCARD 96] VADCARD Philippe ; « Aide à la programmation de l'utilisation des outils en conception de produit » ; Thèse de doctoral ENSAM - Paris ; 1996
- [VERRIER 99] C. VERRIER ; « vocabulaire de la recherche » ; http://educ.univ-paris8.fr/Voc_rech.html; 1999.
- [VIGIER 91] VIGIER Michel G., « Pratique des plans d'expériences – méthodologie TAGUCHI », La petite encyclopédie de la qualité, Les éditions d'organisation, 1991.
- [VILLEMEUR 97] VILLEMEUR Alain, « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : Fiabilité, facteurs humains, informatisation », Collection Direction des études et recherches d'électricité de France, Edition Eyrolles, 1997.
- [WESTNEY 91] WESTNEY RE., « Gestion de petits projets : techniques de planification, d'estimation et de contrôle » traduit par CAUPIN C., directeur de la publication DELIZY G., Edition PARIS : AFNOR 1991.
- [WIENDAHL 98] WIENDAHL H.P., STRITZKE H.; « Logistic orientated product design"; Journal of Materials Processing Technology Volume 76, Issues 1-3 , Pages 12-15 ,1998.
- [WOJCIECH 96] WOJCIECH, GREGA; "Integrated environment for real-time control and simulation"; Computers in Industry, Volume 31, Issue 1, 30 October 1996, Pages 1-14
- [YANNOU 00] YANNOU Bernard, LIMAYEM F. – « La méthode SPEC : Suivi de Performances en cours de Conception » ; IDMME 2000
- [YANNOU 01] YANNOU Bernard, « Préconception de produits », mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches présenté au Laboratoire Productique - Logistique de l'école Centrale de Paris, 2001.
- [YANNOU 02] YANNOU Bernard, HAJSALEM Sinene et LIMAYEM Frej, « Comparaison des apports de l'Analyse de la Valeur et de la méthode SPEC sur un cas industriel », revue Mécanique et Industrie N°3/2 Pages 189-200, 2002.
- [YANNOU 98] YANNOU Bernard, « Conception en mécanique industrielle » ; Edition Les Référentielle Dunod ; Chapitre *** 1998.
- [YANNOU 99] YANNOU Bernard, « Proposition de deux nouveaux outils d'aide à la décision en Analyse de la Valeur bases sur une définition opérationnelle de la valeur », *** 1999.

[YOSHIKAWA 81] YOSHIKAWA, H., "General Design Theory and a CAD System", Man-Machine communication in CAD/CAM, T. Sata, E. Warman edition North-Holland Publishing Company, 1981.

[YOSHIKAWA 89] YOSHIKAWA, H., « Design Philosophy: The States-of-the-Art », Annals of the CIRP, Vol. 38/2/1989.

Marc de HEMPTINNE (1902-1986), Physicien nucléaire, membre de l'Académie Royale des Sciences » de Belgique.

Lee J. CRONBACH (1916-2001), philosophe et psychologue, Prof. à Stanford University USA, président de « American Educational Research Association » et membre de « National Academy of Research »

Patrick SUPPES, philosophe, Prof. à Stanford University USA membre de « National Academy of Research »

François JACOB est un chercheur au CNRS en biologie depuis 1949

Claude Bernard a consacré sa carrière à la pratique et à la défense de la médecine expérimentale, combattant pour une recherche fondamentale qui éclaire la pratique clinique et rende la thérapeutique réellement efficace. La leçon de Claude Bernard a encore éclairé la réflexion des psychologues sur l'articulation de la recherche fondamentale à l'application. Son *Introduction à la médecine expérimentale* (Paris, 1965) reste une lecture obligée pour quiconque s'aventure dans les sciences de la vie (source du sites www.yrub.com)

s'exprime comme une présomption non gratuite portant sur le comportement du système [VERRIER 99]

Un sous-système est une association de composants destinés à remplir une ou plusieurs fonctions opérationnelles au sein d'un système. Un composant est un élément ou un ensemble d'éléments destinés à remplir une fonction particulière dans un sous-système ou un système.

Un questionnaire d'administration par correspondance est une façon

La population d'une enquête est

Les petits projets présentent une ou plusieurs des caractéristiques donc les plus importantes sont :

- Coût variant de 5.000 à 50.000.000 \$,
- existence de nombreux autres projets menés en parallèle,
- partage avec d'autres projets des ressources humaines et matérielles,
- projet mené par une entreprise elle-même petite
- Importance pour l'entreprise considérée comme pas essentielle, voire secondaire

- Nombre d'intervenants nécessaires très faible : 1, 2 ou 3 personnes, rarement plus
- Etc.

[WESTNEY 91], [AFITEP 98]

LEGENDRE est un expert dans le domaine expérimentation chez AEROSPATIALE – Centre commun de Recherches Louis-Bleriot

Rodenacker W. G., Methodisches Konstruieren, Heidelberg, Berlin, 1970 (seconde édition, Springer, New York, 1976) cité par PAHL Gerlald et BEITZ Wolfgang, Engineering design, Springer-Verlag, London, 1988, page 10.

L'ouvrage « Design for X – Concurrent engineering imperatives » sous la direction de George Q. HUANG présente une synthèse des outils méthodologiques pour différents objectifs : conception pour fabrication, conception pour assemblage, conception pour environnement, conception pour le contrôle de qualité, pour la gestion de stock, pour distribution, etc. [HUANG 96]. Ils sont classés en deux groupes distinctes : « Design for the life cycle » et « Design for competitiveness ».

Association Française pour le Contrôle Industriel et la Qualité (**AFCIQ**)

Les grands travaux des années 1980-1982 [Journal de la tour Eiffel] : La reconstruction du plancher allégé des trois quarts de son poids et suppression de toutes les constructions qui étaient accrochées dessous. L'allègement de l'édifice de 1 340 tonnes.

Efficiencia : Rapport entre les résultats obtenus et les ressources utilisées pour les atteindre [OLF 03].

Note(s) : Dans la gestion, on dira plutôt que l'efficiencia est le rapport entre les biens produits ou les services livrés et les ressources utilisées. Il ne faut pas confondre l'efficiencia avec l'efficacité qui est le rapport entre les résultats obtenus et les objectifs fixés. Ainsi, une méthode de travail est efficace si elle permet de réaliser entièrement l'objectif initial et elle est efficiente si un minimum de ressources est utilisé pour l'atteinte de cet objectif. L'emploi du terme *efficiencia* au sens de « haut rendement » et sans idée de « rapport » est considéré comme de l'anglicisme.

Protocole est une instruction précise et détaillée mentionnant, dans l'ordre où elles doivent normalement se dérouler, toutes les opérations à réaliser dans une expérimentation, ainsi que les modalités de ces opérations [OLF 00].

Grâce aux manipulations in vitro étape par étape selon la procédure d'opération de pose, les endoprothèses subissent les mêmes sollicitation que la pose in vivo.

L'introduction d'un cathéter dans une artère et son branchement sur un capteur de pression est la méthode de référence de la mesure de la pression artérielle (Recommandations du Comité Français de Lutte contre l'Hypertension artérielle et de la Société Française d'Hypertension artérielle publiées en 1997)