

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque
|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : «Génie Industriel»

préparée au laboratoire GILCO (Gestion Industrielle Logistique et Conception)
dans le cadre de l'Ecole Doctorale «Organisation Industrielle et Systèmes de Production»

présentée et soutenue publiquement

par

Arnaud RIVIERE

le XX/XX/2004

**Gestion de configuration et des modifications lors du développement de
grands produits complexes en ingénierie concourante – Cas d'application Aé-
ronautique**

Directeur de thèse : Michel TOLLENAERE

JURY

Mr Umberto CUGINI (Politecnico di Milano – Milan)	, Président
Mr Jean Claude BOCQUET (Ecole Centrale – Paris)	, Rapporteur
Mr Philippe LUTZ (ENSAIS - Starsbourg)	, Rapporteur
Mr Michel TOLLENAERE (INPG - Grenoble)	, Directeur de thèse
Mr Michel DUREIGNE (EADS CCR - Suresnes)	, Examineur
Mr Frédéric FERU (EADS CCR - Toulouse)	, Examineur

*« L'innovation systématique requiert la volonté
de considérer le changement comme une opportunité »*

- Peter Drucker -

« il vaut mieux penser le changement que changer le pansement »

- Francis Blanche -

REMERCIEMENTS

Table des matières

1	Contexte et Problématique	1
2	Contributions	3
3	Plan de lecture	4
 CHAPITRE 1 : CONCEPTION ET DEVELOPPEMENT DE PRODUITS AERONAUTIQUES		
7		
1	Introduction	7
2	Le produit Avion	8
2.1	Dimensions critiques et complexité du produit Avion	8
2.2	Le cycle de vie du produit	10
3	L'organisation industrielle et son environnement	11
3.1	Segmentation du marché aéronautique civil	11
3.2	Le marché du transport aérien et ses liens avec l'industrie aéronautique..	12
3.3	Attentes du marché et gestion de l'offre.....	14
3.3.1	Distances à parcourir et nombre de passagers à transporter	14
3.3.2	Modularité des gammes et des produits dans le monde aéronautique	15
3.3.2.1	Familles de produits	15
3.3.2.2	Standards et options	16
3.3.3	Critères de compétition.....	17
3.3.3.1	Coûts d'acquisition et d'exploitation du produit	18
3.3.3.2	Critères environnementaux	18
3.3.3.3	Performances des appareils	18
3.4	Efficacité économique et logique industrielle	19
3.5	L'Entreprise Étendue.....	19
3.5.1	Le développement de l'entreprise étendue AIRBUS	19
3.5.2	La gestion d'un réseau de sous-traitants	20
3.5.3	L'entreprise étendue et le développement d'un nouvel avion	21
4	Le développement simultané et distribué d'un nouvel avion	22
4.1	Ingénierie Concourante : Principes et Application dans l'Industrie Aéronautique	22
4.1.1	Définition de l'ingénierie concourante	23
4.1.2	Principes	23
4.1.3	Application dans l'industrie aéronautique : implications et résultats	25
4.2	Le développement d'un nouvel avion	26

4.2.1	Phase de conception.....	27
4.2.1.1	Optimisation des concepts au niveau de l'avion (Jalons M3-M4)....	27
4.2.1.2	Consolidation de la configuration de référence en conception (Jalons M4-M5)	28
4.2.2	Phase de définition	28
4.2.2.1	Finalisations des spécifications et des propositions commerciales (Jalons M5-M6)	28
4.2.2.2	Définition des composants (Jalons M6-M7)	28
4.2.3	Phase de développement.....	29
4.2.3.1	Initialisation de la fabrication (Jalons M7-M8)	29
4.2.3.2	Fabrication des composants, Assemblage et tests des section équipées (Jalons M8-M9).....	29
4.2.3.3	Assemblage final (Jalons M9-M10)	29
4.2.3.4	Tests au sol et préparation du premier vol (Jalons M10-M11)	29
4.2.3.5	Passage de la certification de type et vérification de la conformité par rapport aux spécifications standards (Jalons M11-M12)	30
4.3	Des supports informationnels pour le développement de produits en ingénierie concourante	30
4.3.1	Formalisation des solutions techniques potentielles (les principes constructifs)	31
4.3.2	Spécifications des équipements avec allocation d'espace (Structures et Installations systèmes)	31
4.3.3	Prise en compte des exigences de soutien dans le développement d'un appareil	32
4.3.4	Définition des formes et des référentiels du produit (Maquette Master Geometry)	32
4.3.5	Allocation des espaces pour la définition des composants (Maquette d'allocation d'espace)	32
4.3.6	La gestion des interfaces (les modèles frontières)	33
4.3.7	Représentation de l'avion défini au travers de la maquette de référence géométrique et du dossier de définition	34
4.4	Gestion du patrimoine informationnel du produit.....	34
5	Conclusions	35
 CHAPITRE 2 : GESTION DE LA CONFIGURATION DE PRODUITS COMPLEXES EN COURS DE DEVELOPPEMENT		37
1	Introduction	37
2	Besoin de gérer la configuration lors des phases de développement	37
2.1	Enjeux et objectifs liés à la gestion de configuration	38
2.2	Gestion de configuration : les points de vues « système » et « produit »...	41
3	La gestion de configuration.....	43
3.1	Gestion et Planning de l'activité de gestion de la configuration	45
3.2	Identification de la configuration	46
3.2.1	Structuration et définition de l'architecture produit.....	46
3.2.2	Les articles de configuration : Des points d'invariance dans la structure du produit	47

3.2.3	Etablissement des configurations de référence ou remarquables	48
3.3	Maîtrise de la configuration : gestion des modifications et des évolutions ..	49
3.3.1	Les Modifications en phase de développement	50
3.3.1.1	Coûts et opportunités de traitement des modifications	50
3.3.1.2	Causes et conséquences des modifications	50
2.1.1.1	Comportement des modifications	54
3.3.2	Un processus générique de traitement des modifications	55
3.3.2.1	Proposition de modification	55
3.3.2.2	Investigations	56
3.3.2.3	Déploiement de la solution	56
3.4	Enregistrement de l'état de la configuration : gestion des configurations de référence	56
3.5	Audit de la configuration : gestion des écarts entre les configurations réelles et les configurations de références	57
3.6	Gestion des données techniques	57
3.6.1	Faciliter le passage des données d'un état à un autre	57
3.6.2.....	Faciliter l'accès aux données en fonction des requêtes émises, des rôles des acteurs et de leurs positions par rapport aux donneurs d'ordres	58
3.6.3	Faciliter l'échange de données par réseaux ou par supports physiques	58
3.6.4	Définir des mécanismes de versionnement de données	58
3.6.5	Etablir des liens entre la configuration du produit et la configuration des données qui le décrivent.....	58
3.6.6	Identifier les différents documents	58
4-	Les outils PLM, des outils supportant l'activité de gestion de configuration des produit complexes en cours de développement	59
4.1	Les fonctionnalités principales des outils PLM	59
4.1.1	Les fonctionnalités dédiées aux utilisateurs	60
4.1.1.1	Coffre-fort de données et de documents (« VAULT »)	60
4.1.1.2	Gestion de la structure produit	60
4.1.1.3	Gestion des workflows et des processus	60
4.1.1.4	Classification et recherche d'informations	60
4.1.1.5	Gestion des programmes et des projets	60
4.1.2	Les fonctions d'utilité.....	61
4.1.2.1	Communication et notification	61
4.1.2.2	Transport des données	61
4.1.2.3	Echange et traduction des données	61
4.1.2.4	Visualisation.....	61
4.2	Contribution des outils PLM à la gestion de configuration.....	61
4.2.1	Apports des outils PLM.....	61
4.2.2	Limitations des outils PLM	62
4.3	La mise en place d'un outil PLM.....	63
5	Problématiques abordées.....	64
6	Conclusions	66

CHAPITRE 3 : MAITRISER ET AMELIORER LE TRAITEMENT DES MODIFICATIONS	67
1 Introduction	67
2 Comprendre le phénomène et la manière de le traiter	67
2.1 La modification : un phénomène aux multiples facettes	68
2.1.1 Comportement d'un système complexe par rapport à une modification	68
2.1.2 Lenteur du processus de traitement.....	69
2.1.3 Problèmes de disponibilité et de congestion	69
2.1.4 Nombre élevé de modifications	70
2.2 Evolutions du processus de traitement des modifications	71
2.2.1 D'un processus qualité vers un processus d'ingénierie.....	71
2.2.2 D'une procédure papier vers un outil intégré.....	71
2.2.3 D'une organisation cloisonnée vers la mise en place d'un processus transverse.....	72
3 Cartographie du besoin lié au traitements des modifications.....	72
3.1 Besoins génériques liés au traitement des modifications	73
3.2.1 Prévention de l'apparition des modifications	73
3.1.1 « Front-loading »	74
3.1.2 Efficience du processus de traitement.....	74
3.1.3 Efficacité du processus de traitement	75
3.1.4 Capitalisation et réutilisation des connaissances issues du traitement	75
3.2 Besoins spécifiques au traitement des modifications relatives à un produit en phase de développement.....	75
3.2.1 Mise en œuvre des stratégies de gestion	76
3.2.2 Accès aux informations	76
3.2.3 Analyse d'impacts des modifications et de répercussions des solutions	77
3.2.4 Pilotage et contrôle du processus de gestion	78
3.2.5 Aide à la décision.....	78
3.2.6 Collaboration.....	78
3.2.7 Réutilisation des informations générées	79
3.3 Besoins spécifiques au traitement des modifications relatives au produit avion en cours de développement	79
3.3.1 L'intégrité fonctionnelle du produit.....	79
3.3.2 L'adaptation du processus de traitement à la configuration de l'organisation.....	80
3.3.3 La traçabilité des informations générées au cours du processus de traitement.....	80
4 Etude des contributions existantes.....	80
4.1 Méthodologie d'étude.....	80
4.2 Maîtriser l'apparition des modifications par la mise en place de méthodes de conception robustes	82
4.2.1 La maîtrise de la qualité lors des phases de conception.....	82
4.2.1.1 Les AMDEC « Analyse des Modes de Defaillance de leurs Effets et de leur Criticité ».....	82

4.2.1.2	La méthode QFD « Quality Function Deployment »	82
4.2.1.3	L'utilisation des plans d'expérience et la méthode de Taguchi.....	83
4.2.2	L'intégration des contraintes liées au cycle de vie du produit dans les phases de conception.....	83
4.2.2.1	Des méthodes de conception spécifiques : « Design For X »	83
4.2.2.2	L'apport des moyens de simulation	84
4.2.3	Maîtriser les variations des caractéristiques et des attributs du produit lors de la conception.....	84
4.2.3.1	L'exploitation des dépendances entre les composants d'un système par l'utilisation des « Design Structure Matrix » (DSM)	85
4.2.3.2	Les modeleurs paramétriques et variationnels en CFAO.....	85
4.3	Vers un traitement robuste des modifications	86
4.3.1	La gestion intégrée des modifications	86
4.3.2	Superviser le traitement des modifications	88
4.3.2.1	Des indicateurs pour le processus de traitement.....	88
4.3.2.2	Planifier le traitement des modifications	89
4.4	L'analyse d'impacts des modifications et ses liens avec les modèles - produits	90
4.4.1	STEP et la gestion de modifications	90
4.4.2	Mesurer les répercussions de la modification d'une spécification.....	93
4.4.3	Une méthode de prédiction des propagations des modifications	94
4.4.4	Un système à base de connaissances pour l'analyse d'impacts des modifications	97
4.4.5	L'évaluation des impacts des modifications sur le produit, sur le système de production et sur les performances de l'organisation.....	99
4.4.6	Un outil de satisfaction de contraintes pour la gestion des modifications : REDESIGNIT	101
4.4.7	Une gestion des modifications basée sur les paramètres du produit.....	103
4.5	Positionnement des contributions existantes	105
5	Conclusions	106
 CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UNE METHODE DE TRAITEMENT DES MODIFICATIONS LORS DU DEVELOPPEMENT D'UN PRODUIT COMPLEXE		
.....		109
1	Introduction	109
2	Proposition d'une méthode de traitement des modifications.....	109
2.1	Le traitement d'une modification conjugue un processus de résolution de problème et un processus de coordination.....	110
2.2	Introduction de la proposition de méthode pour un traitement plus efficace des modifications	111
2.2.1	Processus ciblés et périmètre de la méthode.....	112
2.2.2	Acteurs concernés	113
2.2.2.1	Les gestionnaires de configuration.....	113
2.2.2.2	Les acteurs métiers	114
2.2.2.3	Les comités de contrôle.....	114
2.2	La méthode de traitement – Modèle global.....	114

3	Description de la méthode	117
3.1	Définition et analyse du problème.....	117
3.1.1	Formalisation du problème : de la prise en compte d'un fait technique à la création d'une modification	118
3.1.2	Définition du périmètre du problème : définition de l'étendue de la modification	119
3.1.2.1	Analyse d'impact des modifications	119
3.1.2.2	Groupements et découpage des demandes de modifications	124
3.1.3	Définition des objectifs de la résolution	125
3.1.4	Génération des premiers concepts de solution.....	126
3.1.5	Décision d'ouverture d'une modification.....	127
3.2	Résolution du problème.....	128
3.2.1	Ordonnancement du processus de résolution : ordonnancement du processus de conception des solutions	128
3.2.1.1	Adaptation du processus de résolution aux caractéristiques de la demande.....	129
3.2.1.2	Plannings de conception et allocation des ressources	130
3.2.1.3	Indicateurs et supervision de la conception.....	131
3.2.2	Résolution du problème : conception générale des solutions	131
3.2.3	Evaluation des réponses apportées au problème : évaluation des solutions proposées	132
3.2.3.1	Analyses d'impacts des solutions proposées	132
3.2.3.2	Evaluation des solutions	133
3.2.4	Sélection de la solution à définir	135
3.3	Définition de la solution	136
3.3.1	Conception détaillée de la solution.....	136
3.3.2	Archivage du problème, du processus de résolution et de la solution	137
4	Evaluation de la méthode	138
4.1	Positionnement de la méthode par rapport à la cartographie du besoin	138
4.2	Impacts sur l'organisation	139
4.3	Impacts sur les processus de gestion de configuration.....	139
4.4	Impacts sur la modélisation du produit.....	140
5	Vers une mise en œuvre informatique centrée sur la collaboration.....	140
5.1	TCAO ou Travail Coopératif Assisté par Ordinateur.....	140
5.2	La concept d'espace virtuel partagé	142
5.2.1	Un référentiel informationnel commun	142
5.2.2	Les fonctionnalités de production	143
5.2.2.1	Les fonctionnalités de communication	143
5.2.2.2	Les fonctionnalités de coordination.....	144
6	Conclusions	144
CHAPITRE 5 : LE DEMONSTRATEUR CM-EC.....		147
1	Introduction	147
2	Le démonstrateur CM-EC.....	147

2.1	Objectifs du démonstrateur.....	148
2.2	Le principe d'espace virtuel partagé dans CM-EC	148
2.3	Spécifications fonctionnelles du démonstrateur	149
2.3.1	Les rôles dans le démonstrateur CM-EC.....	149
2.3.2	Les spécifications fonctionnelles du démonstrateur en fonction des rôles	151
2.3.2.1	Les fonctionnalités liées au rôle d'Administrateur	151
2.3.2.2	Les fonctionnalités liées au rôle de Gestionnaire de Configuration	151
2.3.2.3	Les fonctionnalités liées au rôle d'Acteur	151
2.3.2.4	Les fonctionnalités liées au rôle de Comité de Contrôle de la Configuration	152
2.4	Spécifications techniques du démonstrateur	152
2.4.1	Les modèles	152
2.4.1.1	Les cas d'utilisation	153
2.4.1.2	Le diagramme de classes	157
2.4.2	L'architecture de CM-EC et technologies utilisées	159
2.4.3	Les interfaces du démonstrateur CM-EC	161
3	Démonstration des fonctionnalités principales de CM-EC	162
3.1	Le développement du démonstrateur	162
3.2	Illustration des fonctionnalités principales du démonstrateur CM-EC	163
3.2.1	Présentation des espaces en fonction des rôles et des caractéristiques des utilisateurs.....	164
3.2.2	Analyse d'impacts des modifications	165
3.2.3	Gestion et supervision des processus de traitement	166
3.2.4	Communication : notification et forum	166
3.2.5	Evaluation des solutions	167
4	Evaluation du démonstrateur CM-EC	168
4.1	Support CM-EC par rapport aux processus de gestion des modifications existants dans l'organisation	169
4.2	Le module d'analyse d'impacts	170
4.3	Le module d'évaluation des solutions	170
4.4	Introduction possible de CM-EC dans l'organisation	171
5	Conclusions	172
	CHAPITRE 6 : SYNTHESE ET PERSPECTIVES	173
1	Introduction	173
2	Proposition d'une méthode de traitement des modifications lors du développement de grands produits complexes.....	174
2.1	Le processus de gestion de configuration et le processus de développement d'un nouveau produit.....	174
2.2	Recueils des besoins opérationnels et revue des contributions associées aux processus de gestion des modifications.....	175
2.3	La méthode de traitement des modifications proposée	175
2.3.1	Le processus de traitement des modifications	176

2.3.1.1	La bibliothèque de processus	177
2.3.1.2	L'analyse d'impacts	177
2.3.1.3	L'évaluation des solutions	178
3	L'illustration de la proposition avec le démonstrateur CM-EC	178
4	Perspectives	179
4.1	Améliorer et étendre la proposition actuelle	179
4.1.1	Améliorer la proposition actuelle et étendre son périmètre	180
4.1.2	Optimiser l'application CM-EC	180
4.1.3	Analyser la faisabilité d'une intégration	180
4.2	De la détection des impacts à la simulation des modifications	181
4.3	La gestion des connaissances dans les processus de traitement des modifications	181
	CHAPITRE 7 : CONCLUSION GENERALE	183
	BIBLIOGRAPHIE	185
	ANNEXES	197
1	Illustration des liens enrichissant les modèles produits	198
1.1	Liens de composition	199
1.2	Les liens d'association.....	200
1.3	Les liens de positionnement	200
1.4	Les liens de dimensionnement	201
1.5	Les liens de dépendance organisationnelle.....	201
1.6	Les liens de dépendance fonctionnelle	201
2	Diagramme de classe de l'application CM-EC	202
2	Modèles de navigation.....	204

Liste des figures

Figure 1 : Cycle de Développement d'un nouvel avion [AIR01a]	10
Figure 2 : Evolution du trafic aérien entre 1971 et 2001 [ICA01]	12
Figure 3 : Corrélation entre l'évolution du PNB et l'évolution du trafic aérien entre 1980 et 2001[ICA01]	12
Figure 4 : Evolution de la gamme AIRBUS (date du 1 ^{er} vol)	15
Figure 5 : Définition des familles de produits de la gamme AIRBUS	16
Figure 6 : Evolution des facteurs d'acquisition clés selon les compagnies aériennes [FRA03] ..	17
Figure 7 : Worksharing AIRBUS A380	19
Figure 8 : Partages des activités entre partenaires sur le programme A300/A310 [MUL88]	20
Figure 9 : Comparaison des modèles d'ordonnancement en Ingénierie Séquentielle et en Ingénierie Concourante	24
Figure 10 : Intervention des filières dans un programme Avion [AIR02]	27
Figure 11 : Modèles du produit générés et manipulés lors du développement d'un nouvel Avion	30
Figure 12 :Position de la gestion de configuration pour un constructeur aéronautique.	39
Figure 13 : Processus de certification [CAR01]	40
Figure 14 : Facteurs influant sur les pratiques et procédures de gestion de configuration	43
Figure 15 : Composantes de la gestion de configuration	45
Figure 16 : Les niveaux de la structure produit dans un contexte aéronautique	46
Figure 17 : Doublons Articles de Configuration- Solutions Techniques	48
Figure 18 : Volumes et coûts des modifications dans le cycle de vie du produit	50
Figure 19 : Différents types de propagation des modifications	54
Figure 20 : Processus générique de traitement des modifications	55
Figure 21 : Causes et conséquences des modifications	67
Figure 22 : Un processus intégré de traitement des modifications [LIN98]	87
Figure 23 : Pilotage et Modération [LIN98]	87
Figure 24 : Exemple d'indicateurs associés au processus de traitement des modifications [RIV03]	89
Figure 25 : L'entité BOUTEILLE formalisée à l'aide du langage EXPRESS-G [COH98]	91
Figure 26 : Matrice C-FAR [COH98]	91
Figure 27 : Propagation des modifications avec la méthodologie C-FAR [COH98]	92
Figure 28 : L'architecture du modèle produit [SUT02]	93
Figure 29 : Risque direct de propagation d'une modification entre deux composants [CLA01] ..	95
Figure 30 : Arbre de propagation des modifications [CLA01]	95
Figure 31 : Matrice représentant les risques de propagation des modifications [CLA01]	96
Figure 32 : Procédure de traitement d'une modification [MA03]	98
Figure 33 : Méthode d'évaluation de l'impact des évolutions [COL01]	99
Figure 34 : Représentation d'un moteur diesel [OLL01]	101
Figure 35 : la propagation des modifications [ROU03]	103
Figure 36 : Exemple de réseau de paramètres d'un boggy de wagon [ROU03]	104
Figure 37 : Le problème et la solution se construisent simultanément	110
Figure 38 : Incidence de la gestion des modifications sur d'autres processus de l'organisation	112
Figure 39: Modèle global de la méthode de traitement proposée (rôles et processus)	116
Figure 40 : La structure du produit comme un réseau	121
Figure 41 : Positionnement des alternatives selon les trois critères proposés	135
Figure 42 : Trèfle de Ellis [ELL94]	141

Figure 43 : Technologies supportant les modes de communication directe et indirecte (Adapté de [SCH97]).....	143
Figure 44 : Les rôles dans le démonstrateur CM-EC	150
Figure 45 : Cas d'utilisation commun à l'ensemble des rôles	153
Figure 46 : Cas d'utilisation propre à l'administrateur	154
Figure 47 : Cas d'utilisation propre au gestionnaire de configuration.....	155
Figure 48 : Cas d'utilisation propre à l'acteur.....	156
Figure 49 : Cas d'utilisation propre au membre du CCC	157
Figure 50 : Classes associées au produit	158
Figure 51 : Classes associées à l'organisation	158
Figure 52 : Classes en rapport avec l'espace virtuel partagé.....	159
Figure 53 : Les couches d'une architecture 3-Tiers	160
Figure 54 : Architecture "3-Tiers" de l'application CM-EC et technologies mise en œuvre	161
Figure 55 : La présentation des interfaces dépend des rôles et des caractéristiques de l'utilisateur.....	164
Figure 56 : Analyse d'impacts des modifications	165
Figure 57 : Gestion et supervision des processus	166
Figure 58 : Exemple de forum dans un espace de traitement	167
Figure 59 : Notification automatique lors de la validation des tâches	167
Figure 60 : Evaluation des solutions	168
Figure 61 : Piping Trim Tank dans la section 15/21	198
Figure 62 : Vue "As Designed".....	198
Figure 63 : Vue "As Planned"	199
Figure 64 : Liens de composition	199
Figure 65 : Les liens d'association.....	200
Figure 66 : Les liens de positionnement	200
Figure 67 : Liens de dimensionnement	201
Figure 68 : Diagramme de classe de l'application CM-EC	203
Figure 69 : Modèle de navigation commun à l'ensemble des rôles	204
Figure 70 : Modèle de navigation pour les autres rôles de l'application.....	204

Liste des tableaux

Tableau 1 : Dimensions critiques d'un système complexe (le produit Avion)	8
Tableau 2 : Analyse des besoins liés aux traitements des modifications pour un produit en phase de développement.	76
Tableau 3 : Analyse des besoins liés aux traitements des modifications pour un avion en phase de développement	79
Tableau 4 : Positionnement des travaux	81
Tableau 5 : Les AMDEC.....	82
Tableau 6 : La méthode QFD.....	83
Tableau 7 : La méthode Taguchi.....	83
Tableau 8 : « Design for X »	84
Tableau 9 : Les moyens de simulation.....	84
Tableau 10 : Design Structure Matrix.....	85
Tableau 11 : Modeleurs paramétriques et variationnels en CFAO	86
Tableau 12 : La gestion des intégrées des modifications	88
Tableau 13 : Des indicateurs pour le processus de traitement	89
Tableau 14 : Planifier le traitement des modifications	90
Tableau 15 : STEP et la gestion des modifications	92
Tableau 16 : Répercussions de la modification des spécifications	94
Tableau 17 : La prédiction des propagations des modifications	97
Tableau 18 : Un système à base de connaissances pour l'analyse d'impacts des modifications	99
Tableau 19 : L'évaluation des impacts des modifications sur le produit, sur le système de production et sur les performances de l'organisation.....	101
Tableau 20 : la méthode REDESIGNIT	103
Tableau 21 : Une approche du traitement basé sur les paramètres	105
Tableau 22 : Positionnement des contributions par rapport aux stratégies et aux besoins	106
Tableau 23 : Correspondance entre les besoins opérationnels et les processus sous-jacents	112
Tableau 24 : Formalisation du problème – de la prise en compte d'un fait technique à la création d'une demande de modification	118
Tableau 25 : Définition du périmètre du problème – définition de l'étendue de la modification	119
Tableau 26 : Analyse d'impacts premier niveau.....	122
Tableau 27 : Analyse d'impacts au second niveau.....	122
Tableau 28 : Analyse d'impacts au niveau n.....	123
Tableau 29 : Définition des objectifs de la résolution.....	125
Tableau 30 : Génération des premiers concepts de solution	126
Tableau 31 : Décision d'ouverture d'une modification	127
Tableau 32 : Ordonnancement du processus de résolution	129
Tableau 33 : Résolution du problème	131
Tableau 34 : Evaluations des solutions proposées	132
Tableau 35 : Critères considérés lors de l'évaluation des solutions	133
Tableau 36 : Sélection de la solution à définir	135
Tableau 37 : Conception détaillée de la solution.....	136
Tableau 38 : Archivage du problème, du processus de résolution et de la solution.....	137
Tableau 39 : Adéquation de la proposition avec le besoin	138
Tableau 40 : Association des requis fonctionnels liés aux espaces virtuels partagés avec les besoins opérationnels	149
Tableau 41 : Réponse du démonstrateur CM-EC aux besoins opérationnels	163

Introduction Générale

1 Contexte et Problématique

Les produits industriels actuels sont conçus et développés dans des délais de plus en plus réduits. Les industriels tirent un avantage concurrentiel notable à réduire les temps de développement afin de mettre leurs produits sur le marché plus rapidement que leurs concurrents. C'est pourquoi de nouvelles méthodes d'ingénierie ont vu le jour dans les années 80 et se sont généralisées dans les années 90 : conception intégrée, ingénierie concourante, ingénierie simultanée. Ce mode de développement, dans lequel la définition des produits progresse simultanément par le travail de chacun des acteurs de l'ingénierie, nécessite des modes de coordination efficaces pour que la définition converge in fine. Parmi ces modes de coordination, la gestion des modifications permet des ajustements visant à recalibrer la définition lorsqu'un problème est détecté. Or la gestion des modifications est un sujet qui a été peu étudié dans la littérature scientifique. Ce travail de thèse s'est donné pour objectif d'analyser les conditions d'une gestion efficace des modifications.

Paradoxalement, pour un constructeur aéronautique civil, les modifications apportées au produit au cours de son cycle de développement sont aujourd'hui considérées plus comme un problème plutôt qu'une réelle opportunité d'évolution. En effet, de par leur caractère difficilement prévisible, les modifications sollicitées par des acteurs internes ou externes à l'organisation viennent contrarier les dispositions initiales du constructeur prise dans le cadre de la gestion d'un programme. Dans les faits les modifications peuvent se traduire par la remise en cause des échéanciers, des surcoûts, la monopolisation excessive de ressources et, dans des cas extrêmes, par la dégradation de l'image du produit pouvant affecter le positionnement du constructeur sur le marché.

Lorsque l'on se focalise sur le cycle de développement d'un nouvel avion, les modifications apparaissent, malgré leur caractère imprévisible, comme indissociables des activités de conception et de définition. Elles permettent, dans la plupart des cas, d'apporter une réponse technique conforme aux spécifications établies avec la compagnie cliente ainsi qu'aux contraintes exprimées par les corps de métiers intervenant ultérieurement dans le cycle de vie du produit. La maîtrise des modifications au cours des phases de conception permet donc d'appréhender au bon moment les aléas techniques pour garantir la fabricabilité et l'opérabilité du futur produit. Lorsque le constructeur s'appuie sur l'introduction des principes de l'ingénierie concourante dans ses processus de développement afin de réduire les délais de mise sur le marché d'un nouvel avion, la gestion des modifications devient un processus critique. La complexité de ces processus s'accroît encore avec les facteurs organisationnels liés à une organisation en entreprise étendue afin d'optimiser l'utilisation de compétences reconnues. En effet, dans ce contexte et du fait de la complexité du produit, le nombre d'échanges entre les acteurs

de l'organisation augmente et la nature des informations échangées est propice à la remise en cause de solutions techniques déjà figées.

La gestion de configuration fournit un premier cadre pour l'établissement de processus et de procédures permettant de structurer les projets liés au développement de produits complexes. Si, dans un premier temps, cette structuration permet aux acteurs de manipuler les informations relatives au produit de manière cohérente avec les objectifs du projet, elle fournit également un « squelette » du produit sur lequel peuvent être mis en œuvre des mécanismes de gestion des modifications. Cette architecture du produit reflète à la fois la décomposition du produit en composants élémentaires (phases de développement) mais aussi son intégration, depuis les composants élémentaires jusqu'au produit final (phase d'assemblage). Quelle que soit la phase du cycle de vie du produit où ils interviennent, les acteurs bénéficient donc d'une vue commune et partagée du produit permettant une gestion efficace du projet de développement en adéquation avec la logique d'intégration du produit. Ils peuvent ainsi accéder aux composants du produit et y associer des informations complémentaires. Au-delà de la structuration, les normes de gestion de configuration recommandent des procédures de gestion des demandes de modifications. De telles procédures visent plus souvent à normaliser les pratiques de gestion d'une organisation, elles ne laissent que très peu d'optimisations possibles dans le traitement. Elles permettent simplement de garantir que l'ensemble des activités a été réalisé, de l'émission de la demande de modification jusqu'à l'introduction de la solution technique qui y répond.

Aujourd'hui, et plus particulièrement dans les processus de développement, les applications informatiques de PLM (Product Lifecycle Management) intègrent les principales fonctions sur lesquelles reposent ces procédures. Elles visent principalement à bénéficier des avancées des technologies de l'information pour gérer la configuration des produits en cours de développement et les modifications qui leurs sont apportées. Ainsi, les outils PLM permettent un accès contrôlé aux informations validées et à jour et introduisent l'automatisation de tâches procédurales en facilitant l'échange d'informations.

Pourtant, les procédures de gestion de configuration et les applications PLM ne permettent pas aux organisations de s'affranchir des conséquences néfastes des modifications lors du développement d'un nouvel avion, surtout lorsque des cas critiques se présentent. En effet, il arrive souvent qu'une modification impactant un composant implique également la modification d'autres composants afin qu'une solution technique efficace puisse être mise en place : on parlera dans ce cas de propagation d'une modification. Ainsi, la modification initiale d'un composant pouvant être traitée par une entité de l'organisation peut conduire au traitement d'un ensemble de modifications relatives à un système complet impliquant plusieurs entités organisationnelles. Au delà des problèmes que pose une gestion procédurale, cette difficulté fait apparaître le besoin de considérer la gestion d'une modification comme un projet à part entière, de la formulation d'un problème à l'émergence d'une solution.

Cette considération met donc en évidence que des méthodes, mais également des outils, dédiés au traitement des modifications doivent être mis à disposition des acteurs pour un traitement efficace des modifications. Malheureusement, les outils PLM actuellement mis en place dans les organisations industrielles ne permettent pas de garantir cette efficacité lorsque des cas complexes de modifications surviennent.

C'est dans ce contexte que ce travail de thèse s'est donné comme objectif d'apporter une meilleure compréhension au phénomène des modifications, causes, conséquen-

ces, solutions, processus.. dans des organisations et pour des produits complexes. Des propositions méthodologiques visant à la mise en place de méthodes de gestion pertinentes sont attendues comme un résultat de ce travail.

2 Contributions

Les contributions de ce travail se présentent selon deux axes principaux :

- une meilleure compréhension du phénomène des modifications au cours des phases de développement d'un produit complexe.
- des propositions d'optimisation locale du processus de traitement des modifications.

Enfin, la réalisation d'un prototype d'outil informatique a permis de mettre en évidence et de montrer aux acteurs de l'ingénierie les apports et les limites de ces propositions.

La première partie de notre contribution qui s'est appuyée sur une étude de terrain complétée par une bibliographie, vise à comprendre le phénomène global des modifications au cours du développement de produits complexes. Cette phase a permis de mettre en évidence les causes possibles de modifications à la fois à l'intérieur de l'organisation mais aussi par rapport à son environnement. Il en ressort qu'il est très souvent difficile d'identifier une cause unique indépendamment d'autres considérations techniques. Parallèlement, ce travail se focalise sur les conséquences potentielles des modifications, que ce soit sur le produit, les processus ou l'organisation. S'il est, a priori, difficile de prévoir exactement les conséquences d'une modification, il est important de passer en revue l'ensemble des répercussions possibles sans quoi des informations importantes pourraient être ignorées au cours du traitement. De plus, les conséquences d'une modification peuvent être à l'origine d'autres modifications. Ce phénomène, appelé propagation dépend à la fois du contenu et du type de modification mais aussi du comportement du système impacté par cette modification. En effet, la propagation d'une modification dépend des liens qui unissent les composants d'un système mais aussi de la capacité intrinsèque de ce composant à absorber, porter ou propager une modification. Elle est également due à l'importance de la modification demandée. Une meilleure compréhension de ce phénomène nous a permis de déduire des voies d'amélioration intégrées dans la deuxième partie de notre contribution.

La seconde partie de notre contribution vise à optimiser la gestion des modifications en apportant un ensemble d'améliorations locales dans le processus de traitement. Les améliorations proposées dans le cadre de ce travail sont les suivantes :

- 1 *Des processus de traitement adaptés aux caractéristiques des demandes et à leur contexte d'émission.* Dans la plupart des cas, un seul processus de traitement est mis en œuvre pour traiter l'ensemble des demandes. Il arrive donc que la réponse apportée à une demande ne corresponde pas exactement aux attentes des émetteurs. Cette contribution propose donc de mettre en œuvre des stratégies de traitement adaptées aux différents types de demandes. Ces stratégies sont ensuite dérivées en processus de traitement. L'amélioration proposée vise donc à définir et gérer une bibliothèque de stratégies de traitement auxquelles sont associées des processus pouvant être sélectionnés selon une typologie de demandes.
- 2 *La supervision et le contrôle des processus de traitement.* Puisque nous considérons la gestion d'une modification comme un projet de conception, il doit être

mis à disposition du gestionnaire de configuration (« le chef du projet modification ») les moyens de supervision et de contrôle des processus de traitements. L'amélioration proposée vise à mettre en œuvre des moyens de visualisation de l'avancement des activités composant le processus de traitement par rapport aux plannings établis ainsi que des moyens d'action lorsque des déviations sont constatées. Cette démarche intègre également la mise en place d'indicateurs relatifs aux coûts et aux performances du traitement.

- 3 *L'aide à l'analyse d'impact des modifications.* La propagation d'une modification, si elle n'est pas détectée assez tôt, peut conduire à un traitement long et onéreux avec des conséquences néfastes pour l'organisation. Notre contribution propose de mettre à disposition des acteurs un outil d'analyse des propagations des modifications. Si cette analyse reprend en partie la méthode CPM développée par l'EDC [JAR01], elle en propose des extensions en s'appuyant sur une typologie des liens entre composants impliqués dans la propagation. Cette typologie permet d'identifier les caractéristiques des liens entre composants qui seront à prendre en compte. A la différence de la méthode CPM, l'algorithme que nous proposons n'est pas uniquement basé sur l'avis des experts en charge des systèmes, mais aussi sur la présence des liens : nous en escomptons une meilleure adéquation aux situations industrielles. De plus, l'analyse que nous proposons n'est pas automatique mais peut être entièrement conduite selon les orientations choisies par l'acteur.
- 4 *L'aide à l'analyse des solutions techniques proposées en réponse à une demande de modification.* L'aide à l'évaluation proposée ne porte pas sur les performances techniques des solutions mais sur leurs futures implantations. Ainsi, ce sont leurs influences sur le produit, sur l'exploitation du produit et sur l'effort de développement et d'introduction qu'elles requièrent qui sont étudiées. Cette évaluation permet d'évaluer les propositions de solutions les unes par rapport aux autres en fonction de ces critères en vue de la sélection de l'une d'entre elles.

Cette seconde partie de notre contribution est complétée par la proposition du prototype d'application CM-EC (« Collaborative Management of Engineering Changes »). CM-EC vise à illustrer les propositions détaillées précédemment et repose sur des espaces collaboratifs virtuels. A chaque traitement de modification est associé un espace unique créé lors de l'émission de la demande et sauvegardé lors de sa clôture. Chaque espace permet donc de supporter la collaboration entre les acteurs impliqués dans le processus mais facilite également l'accès aux informations requises pour le traitement. Ces informations peuvent être relatives au produit ou au processus de traitement. Les espaces présentent l'avantage de pouvoir gérer les différents projets indépendamment et de contenir des informations qui pourront être utilisés pour de futurs traitements.

3 Plan de lecture

Ce manuscrit de thèse a été organisé selon les cinq chapitres suivants :

- 1 Conception et développement de produits aéronautiques.
- 2 Gestion de configuration de produits complexes en cours développement.
- 3 Maîtriser et optimiser le traitement des demandes de modifications relatives à un produit complexe en cours de développement.
- 4 Proposition d'outil pour le traitement collaboratif des modifications.

5 CM-EC : vers un outil de traitement collaboratif des modifications pour l'industrie aéronautique.

Le premier chapitre apporte des éléments d'information relatifs au contexte dans lequel ce travail de thèse a été réalisé ; ce contexte influe en effet fortement sur les propositions qui se dégagent de ce travail. Ainsi, cette partie décrit dans un premier temps, les éléments qui contribuent à la complexité du produit avion ainsi que les enjeux qui gouvernent cette industrie au cœur d'un marché fortement concurrentiel. Pour s'affranchir de cette complexité mais aussi pour maintenir leur avantage compétitif, les constructeurs aéronautiques ont été obligés d'introduire deux principes essentiels : le fonctionnement en entreprise étendue pour ce qui est de l'espace organisationnel ainsi que les principes d'ingénierie concourante pour comprimer les délais de développement. Nous analyserons l'influence de l'introduction de ces principes sur le processus placé au cœur de nos travaux : le développement d'un nouvel avion.

Le second chapitre s'intéresse aux méthodes actuellement en vigueur pour maîtriser la complexité dans laquelle baigne le développement d'un avion via la gestion de configuration des produits complexes en cours de développement. Les normes de gestion de configuration apportent les procédures élémentaires pour l'établissement des architectures du produit au cours de son cycle de vie et la structuration de son patrimoine informationnel. Elles fournissent également, à partir de ces structures, les mécanismes primaires de gestion des modifications apportées au produit qui constitueront la problématique essentielle de ces travaux. Mais avant d'aborder les solutions qui peuvent être apportées, ce sont les apports et les limitations des outils PLM supportant ces procédures qui sont discutés.

Le troisième chapitre se focalise sur la maîtrise et l'optimisation du traitement des modifications des produits en cours de développement. Pour cela, il apporte des éléments de compréhension du phénomène, c'est à dire les causes possibles de modifications, leurs conséquences potentielles ainsi que les comportements des systèmes pouvant être affectés par des modifications. Cette description permettra de comprendre les apports des travaux relatifs à l'optimisation du traitement des modifications déjà conduits. Ces derniers seront groupés selon deux catégories : les propositions de méthodologies et les propositions d'outils pour le traitement des modifications.

Le quatrième chapitre détaille les principes et les concepts sur lesquels repose notre proposition d'outil pour un traitement collaboratif des modifications. Cette proposition, basée sur les espaces collaboratifs et virtuels, suggère également la mise en place de processus de traitements adaptés aux caractéristiques des demandes de modifications. Elle fournit aussi des éléments de réponse pour l'analyse d'impact des modifications et pour l'évaluation des solutions techniques qui en découlent.

Au travers du prototype CM-EC (Collaborative Management of Engineering Changes) ; le cinquième chapitre décrit la mise en œuvre de cette proposition dans contexte aéronautique. Grâce à ce prototype et par rapport à son évaluation, nous identifions ensuite les apports puis les limitations de notre proposition ainsi que les possibilités d'introduction de ce type d'outil dans l'industrie aéronautique.

En conclusion, nous dégageons les perspectives de recherche mais aussi industrielles encore ouvertes sur ce thème.

Chapitre 1

Conception et développement de produits aéronautiques

1 Introduction

Si les travaux présentés dans cette thèse sont relatifs à la gestion de configuration des produits aéronautiques en cours de développement, nous nous sommes focalisés principalement sur les aéronefs¹ que sont les avions civils à usages commerciaux (transports de passagers et de fret). Avant de détailler plus longuement ce mécanisme de gestion, il apparaît important de décrire le contexte de réalisation de ces travaux afin de relever les spécificités du produit avion et du secteur industriel. La définition du contexte nous permettra ensuite de définir et justifier certaines des orientations que nous avons privilégiées lors du développement de nos propositions ; nous pensons en particulier à la complexité non seulement du produit, mais aussi des organisations industrielles. Elle nous permettra également de différencier les éléments génériques de nos propositions de ceux qui doivent rester spécifiques à l'industrie aéronautique.

Que l'on embrasse le produit dans sa totalité ou que l'on s'attache à décrire un système particulier, la complexité semble indissociable du produit avion. Bien que très souvent qualitative, cette notion doit être spécifiée afin de mettre en valeur ses origines et, quand cela est possible, y associer des notions quantitatives. Ce sera là le premier but de ce chapitre qui comprend également la description du cycle de vie du produit (et les enjeux qui en découlent), particulièrement long pour un artefact industriel.

La complexité du produit doit être maîtrisée à chaque phase de son cycle tout en garantissant l'efficacité économique de l'entreprise sur un marché international. Cette contrainte a conduit à la mise en place d'une logique industrielle de laquelle découlent une architecture organisationnelle et une organisation des processus de conception, de fabrication et de support particuliers. Le second objectif de ce chapitre est donc de décrire dans les grandes lignes cette organisation et cette architecture.

Enfin, le dernier but de ce chapitre sera de comprendre le cycle de conception d'un produit aéronautique dans lequel les concepts liés à l'ingénierie concourante ont depuis une dizaine d'années été introduits. Cette analyse du processus de conception mettra également en valeur les enjeux liés à la gestion du patrimoine informationnel du produit

¹ Au XIX^{ème} siècle, toute machine volante plus lourde que l'air, propulsée par des ailes battantes ou tournantes est considérée comme un aéronef. Depuis le début du XX^{ème} siècle, on considère comme un aéronef tout appareil capable de se déplacer dans les airs [ROB91].

qui, comme nous le verrons par la suite, sera amené à évoluer en fonction de l'avancement du produit dans son cycle de vie.

2 Le produit Avion

Depuis le premier vol des frères WRIGHT en 1903 qui constitue la naissance de l'aviation², les appareils n'ont pas cessé de grandir en complexité. Cet essor est notamment dû aux avancées scientifiques et technologiques, ainsi qu'à l'évolution des processus de développement et d'obtention. Les attentes commerciales et militaires ont la plupart du temps été les moteurs de ces évolutions.

2.1 Dimensions critiques et complexité du produit Avion

Un système complexe peut être défini comme un réseau d'éléments interdépendants, chacun portant ses propres fonctions, et dont les interactions conduisent à déterminer la structure et les performances du produit final [GIN02]. Cette définition, comprenant les notions de dépendance et d'interaction ne suffit toutefois pas à appréhender certains éléments de complexité inhérents au projet associé au développement d'un produit complexe. Afin d'intégrer ces deux dimensions (produit et projet) Hobday dans [HOB98] liste les dimensions critiques du produit permettant ainsi d'établir la complexité du produit. A partir de la définition de ces dimensions critiques d'Hobday, nous proposons une caractérisation du produit Avion (cellules grisées du Tableau 1).

		CRITICITE				
		Très forte	Forte	Moyenne	Faible	Très Faible
DIMENSIONS	Coût d'une unité/Taille du projet					
	Taille du produit					
	Degré d'innovation technologique					
	Nombre de composants logiciels embarqués					
	Quantité de composants					
	Degré de personnalisation					
	Complexité de l'architecture du produit					
	Nombre d'alternatives de conception disponibles					
	Interactions entre les phases amonts et les phases aval du projet					
	Disparité des connaissances et des compétences mises en œuvre					
	Degré d'implication des utilisateurs finaux					
	Instabilité et évolution des spécifications					
	Intensité de l'implication des sous-traitants et des fournisseurs					
	Contraintes légales / Certification					

Tableau 1 : Dimensions critiques d'un système complexe (le produit Avion)

² Le 17 décembre 1903 près de Kitty Hawk en Caroline du Nord (USA), les frères WRIGHT réussirent le premier vol contrôlé et propulsé dans un engin motorisé plus lourd que l'air, le FLYER, un biplan de 335 kg. L'exploit ne dura que 12 secondes, sur une distance de 36,5 mètres [PET91].

La classification d'Hobday fait ressortir des dimensions importantes permettant de caractériser la complexité du produit et du projet de développement qui lui est associé. L'un des moyens permettant de maîtriser cette complexité est de spécifier une architecture modulaire. Ulrich dans [ULR95] souligne qu'une architecture est modulaire « lorsqu'il existe, d'une part, une identité entre les composants physiques et les fonctions, et d'autre part, un découplage des interfaces reliant les composants. En revanche, une architecture produit est qualifiée d'intégrale lorsqu'il n'est pas possible d'associer un composant physique à une fonction et/ou que les interfaces entre les composants sont couplées ». Cette définition met en évidence les éléments fondamentaux qui contribuent à la complexité du produit :

- *Le nombre élevé de fonctions, qu'au travers de ses composants physiques, le produit final, devra réaliser.* Les fonctions que doit réaliser l'avion ainsi que celles intrinsèques à l'appareil sont de nature variée. Afin de s'assurer du développement de l'ensemble de ces fonctions, les constructeurs s'appuient sur la norme ATA³ qui préconise un découpage fonctionnel et physique du produit. Ces découpages sont également utilisés pour la certification des appareils.
- *Le nombre élevé de composants du produit final qui doivent être intégrés.* A titre d'exemple, un avion de la gamme AIRBUS comprend trois millions de pièces et un million et demi si l'on fait abstraction des rivets (cas d'un A340). Si l'enjeu principal du constructeur réside dans le développement, la fabrication ou la fourniture de ces pièces, il doit également s'assurer de la réalisation des fonctions du produit final par les composants physiques. En effet, l'association d'une fonction du produit à un ou plusieurs composants physiques doit être pérenne tout au long du cycle de vie de l'avion afin que ce dernier puisse assurer sa mission. Cette tâche est d'autant plus difficile à réaliser que les composants peuvent être de natures diverses. Il est en effet possible de distinguer les éléments matériels des éléments logiciels. Dans le premier cas, ces éléments peuvent faire appel à des spécialités variées (mécanique, électromécanique, électricité, hydraulique, etc.) alors que dans le second cas il ne s'agit que de code informatique. Comme nous le verrons dans le second chapitre, le développement et la réalisation de ces deux types d'éléments ne font pas appel aux mêmes mécanismes de gestion ni aux mêmes compétences.
- *Les interfaces qui régissent les interactions physiques entre les composants.* Une interface symbolise une dépendance entre des systèmes et des composants du produit. Lors du développement d'un produit complexe, la gestion des interfaces devient stratégique puisque la conception et la fabrication de systèmes liés peuvent être attribuées à différentes entités de l'organisation. Le développement des interfaces est donc au cœur même de la collaboration entre les acteurs de l'entreprise.

La taille et les dimensions du produit sont également des facteurs influant indirectement sur la complexité du produit et du projet de développement. Ces facteurs, ne conduisant qu'à une production en séries limitée d'appareils⁴ du fait des coûts de fabrication liés au dimensionnement des infrastructures de production. Par conséquent les risques associés aux décisions influant sur les moyens de production doivent être limités puisque les décisions sont quasiment irréversibles. Du fait de sa taille, le développement

³ ATA : Air Transport Association (www.air-transport.org).

⁴ A titre d'exemple moins d'une trentaine d'avions AIRBUS sortent des lignes d'assemblage chaque mois.

d'un avion est donc étroitement contraint par le développement des infrastructures manufacturières et par l'élaboration des plannings de production.

2.2 Le cycle de vie du produit

Le temps de développement et la durée de vie d'un appareil sont également peu communs pour un produit industriel. En effet, la durée de vie du produit est généralement d'une trentaine d'années. Le constructeur doit donc s'assurer pendant environ trente-cinq ans de l'opérabilité des appareils en service dans les compagnies dans le respect des normes de sécurité. Il doit donc maîtriser l'évolution d'une flotte grandissante dans le temps et apporter une réponse aux difficultés techniques rencontrées par les compagnies. Les exigences de maintenance et de fiabilité doivent donc être intégrées dans le cycle de conception avec une vision à long terme. Les choix et les décisions prises en conception peuvent donc avoir une incidence sur la durée de vie d'un appareil, d'où l'importance d'exploiter, pour des avions déjà produits, les faits techniques survenus en compagnie afin d'élaborer des modèles et des connaissances pouvant être utilisés lors de phase de conception.

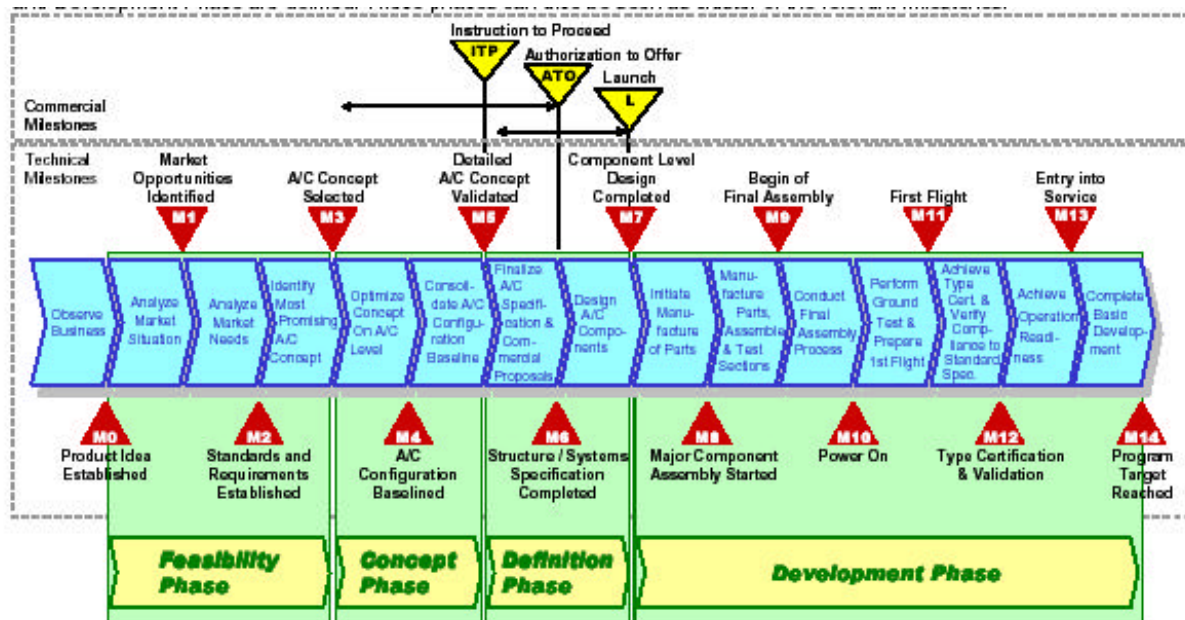


Figure 1 : Cycle de Développement d'un nouvel avion [AIR01a]

Si l'on s'attarde maintenant sur le cycle de développement d'un nouvel avion (Cf. Figure 1), on constate que celui-ci peut varier selon que l'avion développé est une adaptation d'un modèle existant ou une toute nouvelle référence. Ainsi, selon le cas, le cycle de développement pourra durer entre 4 et 5 ans (alors que dans le passé le cycle de développement d'un produit était d'une dizaine d'années). Ce temps de développement particulièrement long peut s'expliquer par la complexité du produit et impliquera la gestion d'un projet onéreux nécessitant l'allocation d'un nombre important de ressources. La notion de risque, notamment liée au montant des investissements, associée à ce type de projet doit donc être maîtrisée afin que la compétitivité de l'entreprise ne soit pas mise à mal. Ceci en tenant compte que le constructeur doit gérer en parallèle des programmes dont la durée de vie peut être supérieure à une quarantaine d'années.

3 L'organisation industrielle et son environnement

Le but de tout constructeur d'avions civils est de maîtriser la complexité du produit afin de proposer des produits en adéquation avec les attentes des différents segments du marché. Comme nous le verrons dans cette partie, ce défi a des répercussions sur la configuration de l'entreprise ainsi que sur le partage des activités de développement au sein de l'organisation.

3.1 Segmentation du marché aéronautique civil

Le marché aéronautique est généralement découpé selon quatre catégories : le marché des avions d'une capacité supérieure à cent places, le marché des avions d'affaires ou régionaux d'une capacité inférieure à cent places, le marché des motorisations et le marché lié à la maintenance et la réparation des appareils (en anglais : Maintenance, Repair and Overhaul soit MRO). A ces marchés pourraient être ajoutés ceux relatifs à des sous-ensembles remarquables de l'avion telle que l'avionique par exemple.

Le marché des avions de plus de cent places est étroitement lié au marché du transport aérien pour les longs trajets et il est discuté plus en détail dans la partie 3.3 puisqu'il correspond au segment visé par le constructeur aéronautique auquel nous nous intéressons (AIRBUS).

Le marché des avions de transport de moins de cent places répond un besoin de transport régional. Ils offrent donc des capacités ainsi qu'un rayon d'action limités puisqu'ils ne sont pas destinés à relier des plate-formes de correspondances (« hub ») intercontinentales mais des aéroports secondaires pour une clientèle principalement d'affaires. Ce segment n'est pas le théâtre majeur de la compétition que se livrent les deux acteurs principaux du marché : AIRBUS et BOEING. Puisque le rayon d'action de ce type d'avion est limité et la taille des compagnies qui les exploitent peut être réduite, le choix des motorisations sera différent du segment de plus de cent passagers.

Les moteurs sont fournis aux constructeurs pour un appareil précis. Toutefois, un moteur est plus souvent sélectionné par le client final, c'est à dire une compagnie aérienne. Jusqu'à une époque très récente, les ventes de moteurs étaient gouvernées par deux tendances : la volonté des compagnies d'uniformiser les moteurs sélectionnés au sein de leurs flottes afin de minimiser les coûts de maintenance ainsi que les choix laissés dans les options par les constructeurs. Depuis peu, les compagnies semblent prêtes à diversifier leurs choix de motorisations tout en privilégiant certains types de moteurs. De plus, les avionneurs semblent maintenant privilégier une offre de combinaisons moteurs/structure soit entièrement européenne soit entièrement américaine. De manière simplifiée, il est possible de dire que le marché des motorisations évolue de manière opposée à celui du MRO et qu'il bénéficie directement de la progression des ventes de nouveaux appareils.

Le marché de la MRO est prépondérant dans cette industrie où les cycles de vies des produits sont particulièrement longs. Le premier Boeing 747 introduit en 1968 est, par exemple, toujours opérationnel. Ainsi, les clients majeurs de la MRO sont les propriétaires et les opérateurs des appareils. Ce marché dépend étroitement du nombre d'appareils en opération et de l'obsolescence des appareils les plus âgés qui sont fortement contraints par les règlements de sécurité ainsi que par des coûts de maintenance prohibitifs. Pour cette raison, il est très souvent plus économique et moins risqué pour une compagnie d'investir dans l'acquisition d'un appareil neuf.

3.2 Le marché du transport aérien et ses liens avec l'industrie aéronautique

Depuis trente ans, le trafic aérien est en constante évolution, même si toutefois il a connu quelques courtes périodes de ralentissement causées par des crises économiques et financières (Cf. Figure 2).

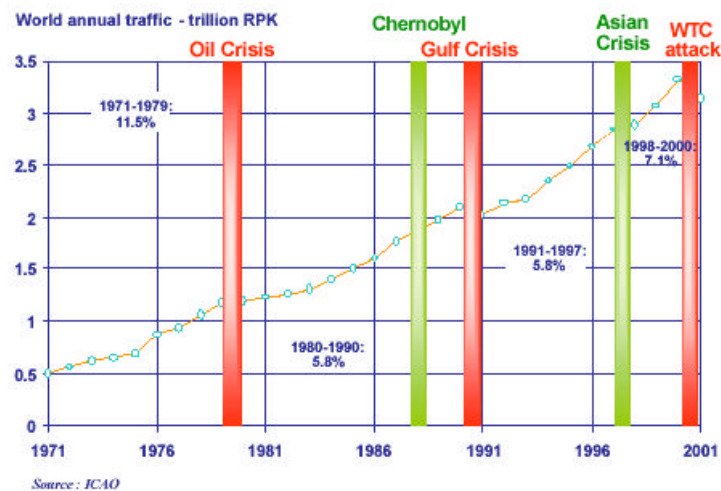


Figure 2 : Evolution du trafic aérien entre 1971 et 2001⁵ [ICA01]

L'évolution du marché est très fortement corrélée à l'évolution des richesses internationales mesurées en terme de PNB (Produit National Brut) (Cf. Figure 3). Il est donc naturel que ce marché soit en constante évolution puisqu'en moyenne ces richesses ne cessent d'évoluer.

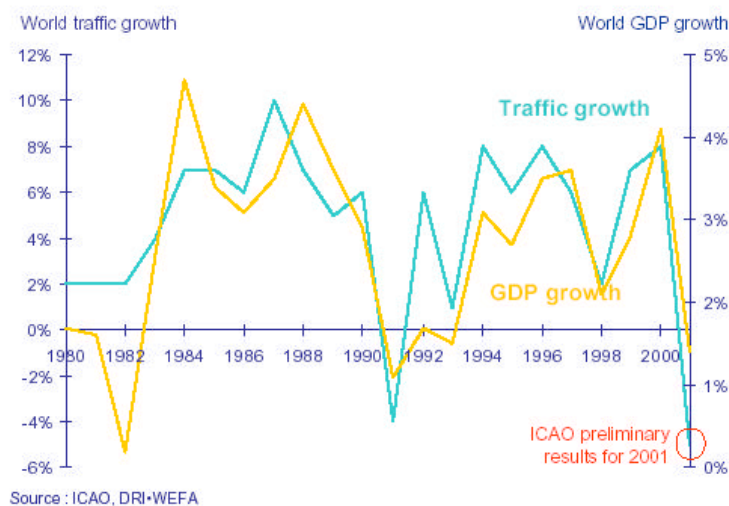


Figure 3 : Corrélation entre l'évolution du PNB et l'évolution du trafic aérien entre 1980 et 2001[ICA01]

Toutefois, comme beaucoup d'autres secteurs, les fluctuations du marché du transport aérien dépendent du contexte économique général. Il est important de préciser que ces

⁵ RPK : Revenu Passager-Kilometre

évolutions du marché du transport ne seront pas les mêmes selon les segments et les zones géographiques. Ainsi, selon certaines prévisions, alors que le trafic mondial représente aujourd'hui près de 4 000 Milliards de RPK, il devrait s'élever à 8 300 milliards de RPK en 2020. Malgré cela, l'ensemble des routes aériennes et des marchés domestiques ne vont pas suivre la même évolution. Par exemple, selon certains analystes, les marchés domestiques nord-américains, aujourd'hui les plus importants, représentent près de 25,9% du trafic mondial et la route entre l'Europe et l'Amérique du Nord est aujourd'hui la plus parcourue. En 2020, la zone la plus importante sera la zone Asie pacifique avec un trafic représentant 18.4% du trafic mondial et les routes Asie/Pacifique – Europe et Asie/Pacifique – Amérique du Nord viendra concurrencer la route Europe – Amérique du Nord [AIR02]. Ces évolutions du marché doivent être analysées au plus juste par les constructeurs afin de déterminer leurs impacts sur leurs carnets de commandes mais aussi pour se positionner sur le marché. Cette démarche permet aux constructeurs à la fois de stabiliser leurs systèmes de production et de support ainsi que prévoir de futurs développements d'appareils. La prévision comprend le genre d'appareils en terme de type (nombres de sièges et distances à parcourir) ainsi que certaines grandes caractéristiques sous-entendues par la zone géographique et le segment visé (vols continentaux ou inter-continentaux). Bien sûr, de telles prévisions ne s'appuient pas uniquement sur des analyses de marchés mais aussi sur la connaissance qu'entretient le constructeur de la flotte de ses différentes compagnies clientes. En effet, la cohésion des flottes et leur renouvellement seront des éléments importants à prendre en compte dans l'analyse des marchés potentiels.

Comme l'a récemment illustré l'actualité, le marché du transport aérien est également très lié au contexte politique et sanitaire. Pour généraliser, il est possible d'affirmer que la santé de ce marché dépend de la perception que les clients et les autorités ont du risque dans le transport. Pour une compagnie aérienne, ces conditions défavorables peuvent se traduire par des retards voire des annulations ainsi que des modifications des routes habituelles. Ces faits influenceront sur la santé financière d'une compagnie et par conséquent sur ses investissements. Dans ces conditions, un constructeur peut voir des commandes enregistrées ou des options d'achat être annulées, la nature de certaines commandes être modifiées, et enfin des délais de livraison être allongés voire, dans certains cas, faire l'objet d'une réduction. Ces événements sont d'autant plus problématiques pour l'organisation si l'on prend en compte le coût d'un appareil et les possibles répercussions financières d'une modification de commande⁶.

Face à cette instabilité du marché du transport aérien et par rapport à la concurrence qui se joue sur ce marché, le maintien d'un avantage compétitif ne dépend que de la flexibilité et la réactivité dont peuvent faire preuve les organisations et leurs chaînes logistiques. Puisqu'un avion est produit en séries, l'essentiel de ces qualités sont généralement acquises durant les phases de fabrication et d'assemblage. Ainsi, le but des constructeurs est d'optimiser les cycles de fabrication et d'assemblage tout en laissant suffisamment de degrés de libertés dans leurs systèmes pour absorber des modifications de plans de charges. Il a été observé chez plusieurs constructeurs que ce type de démarche les conduit généralement à se focaliser sur les tâches d'intégration et d'assemblage et à externaliser les activités à faible valeur ajoutée vers la sous-traitance [USI03]. Par ailleurs, les approvisionnements deviennent plus stricts afin d'éviter les stocks intermédiaires. Si, à première vue, il est possible de penser qu'un constructeur recherche la flexibilité au travers de son réseau de fournisseurs et de sous-traitants, le fait que cette démarche s'inscrive dans une politique de coopération à

⁶ A titre d'exemple, le prix de vente d'un A380-800 (transports de passagers) s'élève à près de 275 millions de dollars US.

long-terme entre deux « partenaires » doit également être pris en compte. Ceci afin de ménager les fournisseurs ainsi que les sous-traitants au-delà des rangs $n-2$ qui ne supporteraient pas une trop forte fluctuation de leurs charges. Pour être efficace, cette politique de réduction des délais s'appuie sur une reingénierie forte des processus industriels du constructeur ainsi que sur des dispositifs de coordination et de coopération avec sa chaîne logistique.

Si l'on examine maintenant l'incidence des fluctuations du marché sur les phases de développement, on notera qu'elles peuvent conduire à :

- une remise en cause des programmes en cours d'études et dont le lancement n'a pas encore été déclenché (lorsqu'il n'y a pas encore de contrat passé avec une compagnie cliente),
- l'établissement d'une politique de réduction des coûts de développement au sein de l'entreprise et de son réseau de sous-traitants.

Quelles que soient les fluctuations de ce marché, les compagnies clientes expriment leurs attentes sous la forme de grandes caractéristiques auxquelles devra se conformer le produit à livrer. C'est autour de ces caractéristiques que s'affronteront les arguments commerciaux des différents constructeurs.

3.3 Attentes du marché et gestion de l'offre

Pour le transport de passagers, les compagnies aériennes ciblent leurs demandes selon deux grandes caractéristiques : la distance à parcourir et le nombre de passagers à transporter. Du point de vue du constructeur, l'objectif est donc de proposer sur le marché une offre de produits capable de couvrir l'ensemble de ces besoins tout en prenant en compte le positionnement existant de ses concurrents.

Puisqu'il devient très difficile de se positionner sur des segments « vierges » du marché et qu'il est nécessaire de convaincre les compagnies clientes de la rentabilité et de l'opérabilité des appareils proposés, d'autres critères peuvent également être pris en compte.

3.3.1 Distances à parcourir et nombre de passagers à transporter

Pour une compagnie aérienne, l'acquisition d'un appareil (ou d'une flotte) se décide principalement en fonction, des routes visées. Elles s'expriment selon deux caractéristiques : le nombre de passagers à transporter et la distance à parcourir entre le point d'arrivée et le point de départ ou entre des escales intermédiaires.

Le constructeur doit donc adapter son offre à l'évolution des routes afin de couvrir au plus juste les besoins des compagnies (Cf. Figure 4).

Pour que la gestion d'une telle gamme soit possible et apparaisse comme cohérente aux compagnies, les avionneurs s'appuient sur la définition de familles de produits basées sur le concept de modularité.

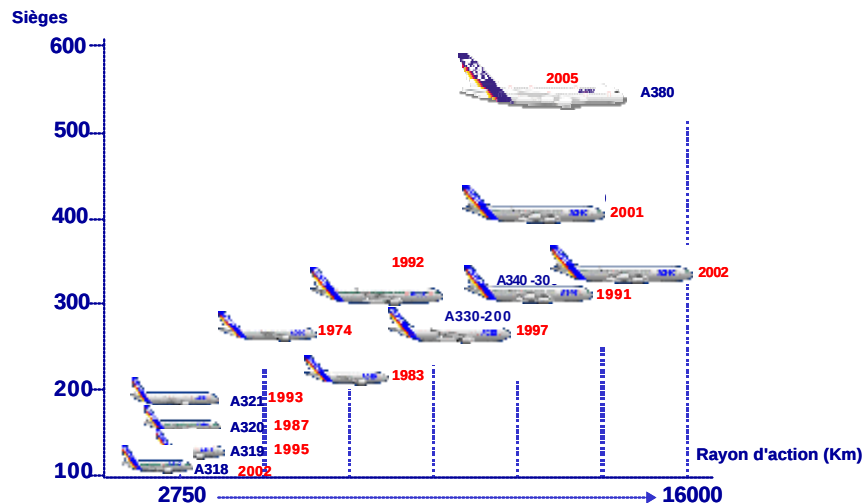


Figure 4 : Evolution de la gamme AIRBUS (date du 1^{er} vol)

3.3.2 Modularité des gammes et des produits dans le monde aéronautique

Si la modularité permet de s'affranchir de la complexité inhérente au produit, elle permet principalement de différencier les types d'avions proposés tout en gardant une gamme homogène. En modularisant son offre, l'avionneur peut proposer des produits diversifiés tout en bénéficiant des avantages de la production en grandes séries et en gardant une offre cohérente vis à vis des compagnies clientes.

La modularité peut être observée à plusieurs niveaux et selon plusieurs points de vue, comme nous allons maintenant le voir.

3.3.2.1 Familles de produits

La définition de familles de produits au sein d'une gamme permet à un constructeur de :

- rationaliser son offre et y associer une politique cohérente d'évolution,
- factoriser ses efforts de développement et de fabrication en définissant des plates-formes pouvant être personnalisées selon les attentes des compagnies clientes,
- simplifier la chaîne logistique et la politique d'approvisionnement,
- gérer de manière cohérente les centres de compétences (bureaux d'études et unités de production) ainsi que l'implication des sous-traitants,
- faciliter la certification des appareils.

La modularité revient à définir les communalités des caractéristiques des produits du catalogue de l'avionneur. Elle est à la fois relative aux caractéristiques de la mission que doivent remplir les appareils mais aussi aux choix de configurations ou technologiques qui en découlent (Cf. Figure 5).

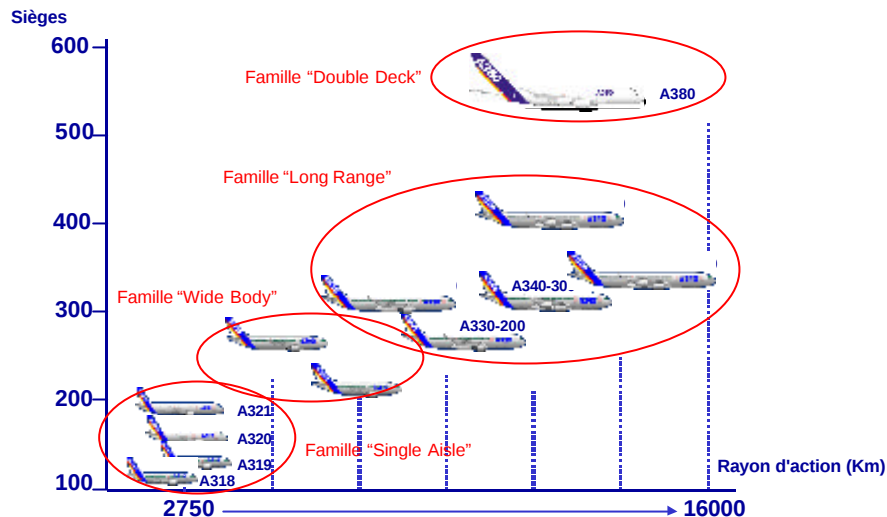


Figure 5 : Définition des familles de produits de la gamme AIRBUS

Pour une compagnie aérienne, la définition de familles de produits présentent également de nombreux avantages pouvant s'avérer décisifs lors de l'acquisition d'un appareil (ou d'une flotte). Ils sont liés à l'exploitation des appareils car la modularité permet [AIR03][KLA81]:

- une réduction des temps de formation des pilotes et des équipages car peu de différences existent entre les cockpits, les cabines et les procédures de vols. Ainsi, à moindres coûts, les compagnies peuvent former leurs équipages afin d'obtenir plusieurs qualifications. Démarche qui leur permet d'améliorer la gestion des ressources selon les vols planifiés.
- d'optimiser les procédures de maintenance et d'entretiens des appareils.

Du point de vue du client, la modularité est donc synonyme de gains opérationnels mais aussi de flexibilité dans la gestion d'une flotte d'appareils.

Si la première forme de modularité peut donc être observée au niveau de l'offre du constructeur, elle ne permet pas de gérer les personnalisations que requièrent les compagnies aériennes.

3.3.2.2 Standards et options

La concurrence que se jouent les avionneurs civils est en partie liée à l'adéquation de leurs offres avec les besoins des compagnies notamment au travers des configurations des cabines proposées et de leurs aménagements mais aussi par rapport à leurs choix de motorisations. Tout en essayant de répondre à ces besoins variés, l'avionneur doit garantir la rentabilité de ses propositions. L'avionneur définit donc un appareil selon un standard qu'il enrichit d'options et auquel il associe la motorisation sélectionnée parmi celles possibles [AIR01b].

Au sein d'une même famille, les standards définissent différentes plates-formes constituant les bases pouvant être proposées aux compagnies clientes. Une base constitue la partie « stable » de l'appareil dont la constitution ne peut pas être soumise au choix de la compagnie cliente. Généralement, lorsque le constructeur désire faire évoluer une famille de produit, il enrichit un standard (ou plusieurs d'entre eux) afin d'en créer un nouveau.

A la partie stable est associée une partie variable constituée d'options que la compagnie cliente peut choisir à partir d'un catalogue selon les contraintes associées au standard préalablement sélectionné. Le catalogue résume, pour des fonctions données, des solutions techniques qui ont déjà été étudiées et que l'avionneur est donc en mesure de proposer. Toutefois lors des négociations commerciales, une compagnie peut solliciter l'étude de solutions alternatives non couvertes par le catalogue. Dans ce cas, et si l'avionneur est en mesure de répondre à la requête, celle-ci sera traitée comme une modification et le catalogue pourra être enrichi. Le coût de la modification sera soit pris en charge par le constructeur soit par la compagnie cliente selon le type de requête et le contexte dans lequel elle est émise.

Enfin, l'avionneur offre, pour chaque standard défini, un choix de motorisations restreint qui est défini en partenariat avec les motoristes. Les motorisations ne peuvent pas être modifiées par le client puisqu'elles influent sur le développement même des solutions techniques associées au standard et donc sur la sécurité des appareils.

Par conséquent, il est rare que deux avions produits par l'avionneur soient identiques, sauf lorsqu'une compagnie commande une flotte d'appareils. Pourtant, il devra gérer la configuration de ces différentes combinaisons tout au long de leurs cycles de vie et suivre leurs avancements lors des phases d'industrialisation en gérant les modifications qui pourront y être apportées.

3.3.3 Critères de compétition

La modularité de l'offre ainsi que le rayon d'action et la capacité ne sont pas les seuls critères de compétition entre avionneurs. Aujourd'hui, d'autres critères deviennent prépondérants dans la définition d'une politique commerciale. Certains d'entre eux ont d'ailleurs conduit les constructeurs à développer de nouveaux produits de meilleure qualité, plus rapidement et moins chers. Cette stratégie est plus connue dans le monde aéronautique sous le nom de « Better, Faster, Cheaper » [MUR00]. Une déclinaison de cette stratégie s'adapte aussi au produit si l'on en croit les arguments d'un grand constructeur européen dont le lancement d'un des ses nouveaux appareils était accompagné du slogan « Longer, Larger, Farther, Faster, Higher, Quieter, Smoother ». Ce slogan traduit en partie les attentes des compagnies aériennes autour desquelles s'articule la compétition entre constructeurs (Cf. Figure 6).

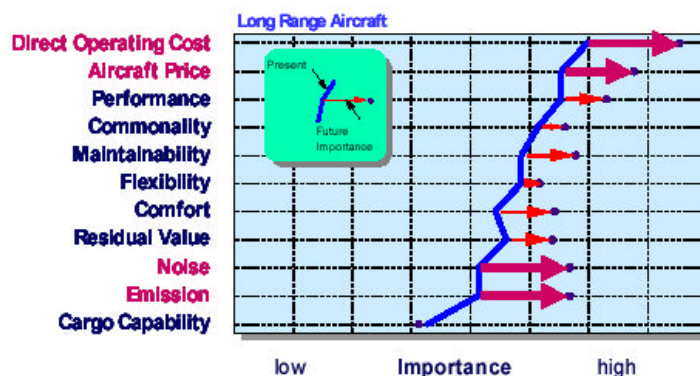


Figure 6 : Evolution des facteurs d'acquisition clés selon les compagnies aériennes [FRA03]

Une partie de ces critères est abordée ci-dessous afin d'identifier les caractéristiques de l'appareil qui devront être privilégiées lors de son développement.

3.3.3.1 Coûts d'acquisition et d'exploitation du produit

Pour les compagnies aériennes, le coût d'acquisition d'un appareil ou d'une flotte peut être prohibitif puisqu'il les conduit généralement à s'endetter. Cet endettement est justifié si les compagnies établissent des profits sur les lignes où le produit est exploité. Les marges de profit dépendront en grande partie des conditions et des coûts d'exploitation des appareils ; le but étant de garantir une disponibilité maximale des appareils à moindre coût tout en garantissant des conditions maximales de sécurité aux passagers transportés. Pour être compétitif, un constructeur doit viser une diminution du coût d'acquisition de son produit au travers d'une rationalisation des phases de conception et de fabrication. Parallèlement, il doit intégrer les exigences liées au soutien et à l'exploitation du produit au plus tôt dans le cycle de développement du produit afin d'optimiser l'utilisation du produit dès son entrée en service.

3.3.3.2 Critères environnementaux

Les préoccupations environnementales sont aujourd'hui incontournables dans l'industrie [ISO98]. Pour les constructeurs aéronautiques, ces préoccupations sont essentiellement regroupées autour de deux axes : la réduction des émissions et la réduction de la pollution sonore. Selon la vision des acteurs majeurs du marché européens [GOP01], pour les vingt prochaines années, les réductions visées devraient être de l'ordre de 50% pour les émissions de CO₂ de 80% pour le NO et de 50% des bruits perceptibles.

Ces objectifs visent à augmenter le confort des passagers transportés tout en limitant les impacts environnementaux ainsi qu'une partie des nuisances aéroportuaires. Ceci afin de préserver l'image des constructeurs et des compagnies auprès du public. La réalisation des objectifs est étroitement liée aux collaborations entre constructeurs et motoristes et aux améliorations des performances de vols des nouveaux appareils.

3.3.3.3 Performances des appareils

Le poids des avions est l'un des freins à leurs performances⁷. Il doit donc être maîtrisé dès la conception afin d'éliminer les surcharges superflues de l'appareil. La contribution des nouveaux matériaux, lorsqu'ils sont matures, exploitables industriellement et commercialement attractifs est d'ailleurs significative pour la réduction des surcharges. C'est en partie pour cette raison que l'usage des matériaux composites tend à se développer dans l'industrie aéronautique.

L'autre facteur à prendre en compte lors du développement de nouveaux appareils est la réduction de la traînée et des effets vortex afin de réduire les turbulences (amélioration du confort des passagers) et les consommations de carburant (augmentation du rayon d'action). L'apport constant d'améliorations aérodynamiques tant au niveau de la structure que de la voilure est donc une démarche primordiale dans la conception des nouveaux appareils.

Malgré la complexité affichée du produit et les contraintes induites par un marché compétitif et fluctuant, les constructeurs doivent produire des appareils en grandes séries tout en préservant leurs marges financières.

⁷ Dans l'industrie aéronautique, il est communément admis que si le poids d'un appareil est multiplié par deux lors de son développement, sa puissance doit être multipliée par huit.

3.4 Efficacité économique et logique industrielle

Le partage des tâches de conception et de fabrication selon un découpage négocié du produit, aussi appelé «worksharing », est un des moyens dont dispose les constructeurs pour s'affranchir de la complexité du produit tout en respectant une logique industrielle qui garantira la rentabilité de l'organisation. Cette stratégie permet d'associer la responsabilité d'une unité majeure de l'organisation à une partie de l'avion (une zone géographique de l'appareil et un ensemble de fonctions). Si elle est souvent adoptée pour des raisons historiques liées à la construction des organisations industrielles aéronautiques, elle n'en reste pas moins efficace.

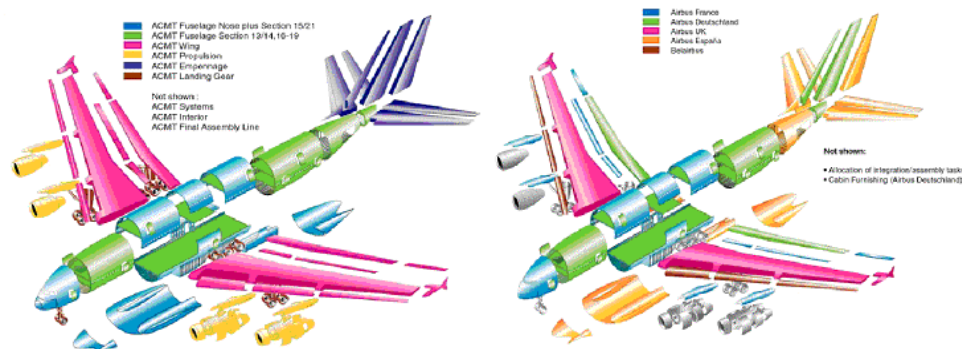


Figure 7 : Worksharing AIRBUS A380

L'enjeu majeur de cette stratégie est de définir précisément le découpage du produit et d'identifier clairement les compétences industrielles de chaque partenaire afin de garantir un partage logique des tâches et l'intégration finale du produit. Le partage, la coordination des activités et le pilotage de l'intégration finale sont généralement gérés par la direction du programme. Elle sera également responsable de la définition des règles de gestion et des contraintes associées aux interfaces entre les lots.

Ainsi, le développement d'un nouvel avion sera le résultat de nombreuses interactions entre les acteurs du programme, dont les rôles et les activités peuvent être différents, remettant en cause les modèles traditionnels d'organisations industrielles pour laisser place au modèle de l'entreprise étendue.

3.5 L'Entreprise Étendue

Aujourd'hui, l'entreprise étendue ne comprend pas uniquement les acteurs de l'organisation mais intègre également des partenaires extérieurs tels que les sous-traitants. Les frontières de l'organisation devenant difficiles à figer, le modèle de l'entreprise étendue considère comme une seule et même organisation les intervenants du projet de développement.

Si ce phénomène est largement observable dans la majorité des organisations industrielles, le développement de l'entreprise étendue chez l'avionneur AIRBUS s'avère particulier puisqu'il s'appuie sur des évolutions organisationnelles successives dont l'héritage doit être évoqué.

3.5.1 Le développement de l'entreprise étendue AIRBUS

Au début des années 70, la réalisation du premier programme AIRBUS A300/A310 s'appuie sur les compétences des entreprises majeures du secteur aéronautique euro-

péen. Suivant une logique de découpage modulaire, chacun des partenaires se voit attribuer le développement et la réalisation d'un ou plusieurs sous-ensembles de l'appareil (Cf. Figure 8).

PARTENAIRES	ACTIVITES
AEROSPATIALE (France)	Cockpit (Intégration des systèmes de pilotage et de navigation), caisson central de voilure, mâts réacteurs, assemblage final.
DASA (Allemagne)	Fuselage, empennage vertical, aménagement commercial.
BAe (Grande-Bretagne)	Voilure
CASA (Espagne)	Empennage horizontal, portes de trains et de cabines.
BELAIRBUS (Belgique) et FOKKER (Hollande)	Parties mobiles de voilures

Figure 8 : Partages des activités entre partenaires sur le programme A300/A310 [MUL88]

La décomposition du produit et le partage des activités provoque une spécialisation des compétences et des connaissances des partenaires. La spécialisation des partenaires (et de chacun de leurs sites) se déroule à un double niveau : une spécialisation par sous-ensembles qui repose sur une homogénéité technique du produit et une spécialisation par compétences (usinage, chaudronnerie, composites, etc.). La reconnaissance de ces spécialisations permet à l'organisation d'éviter la duplication de moyens industriels, d'améliorer le taux d'utilisation des postes de fabrication/assemblage, de valoriser des compétences spécifiques tout en minimisant les déplacements entre les sites.

Au cours des années 70 afin d'éviter toute asymétrie de ressources mais surtout pour des raisons d'efficacité commerciale, les partenaires ont préféré mutualiser la fonction commerciale, plutôt que de la confier à un partenaire particulier, en créant le GIE AIRBUS⁸. Peu à peu, au fil des programmes, le GIE AIBUS a gagné en autonomie en résolvant des problèmes complexes regroupant des variables techniques et commerciales. De plus, le GIE a su conforter les partenaires dans leurs spécialisations en s'affirmant comme l'architecte des programmes capable d'entretenir une approche globale du produit. En outre, une telle approche impliquait une parfaite maîtrise du produit aux interfaces entre partenaires.

Avec la création d'AIRBUS en société intégrée, ce rôle d'architecte-intégrateur s'est affirmé, les partenaires gardant les mêmes responsabilités qu'auparavant. Toutefois, les interfaces entre les organisations mais aussi avec les architectes du programme s'estompaient, chacun devenant une unité de l'organisation (Cf. Figure 7). Cette intégration (qui peut être également considérée comme une autonomisation) s'est accompagnée d'un mouvement d'externalisation des tâches de développement et de fabrication vers les sous-traitants.

3.5.2 La gestion d'un réseau de sous-traitants

Aujourd'hui, les performances des avionneurs reposent en partie sur le réseau de sous-traitants qu'ils animent. Ainsi, pour le développement et la production du futur Airbus A380, 70% des activités seront réalisées par le réseau de sous-traitance.

Selon le point de vue du donneur d'ordre, les acteurs de ce réseau peuvent être regroupés selon plusieurs catégories [ACH01][TAL01]:

⁸ GIE : Groupement d'Intérêt Economique

- *Les sous-traitants de premier niveau.* Ce sont des concepteurs-assembleurs de systèmes complets souvent qualifiés d'équipementiers multi-métiers. Ils possèdent des ressources et des acquis pouvant être relativement éloignés des métiers de l'avionneur mais pourtant essentiels à la réalisation de l'avion (trains d'atterrissage, systèmes de conditionnement d'air, etc.). Cette position leur donne du poids dans la négociation puisque les travaux délégués par le constructeur ne présentent pas l'essentiel de leurs activités. Ils sont en liaison directe avec le donneur d'ordres de façon suffisamment stable dans le temps pour permettre l'amortissement des investissements consentis. Les règles de la sous-traitance globale s'appliquent ici en totalité, hormis le fait que le plus souvent les équipementiers conservent la propriété intellectuelle des produits qu'ils ont conçus. Et puisque ces mêmes règles visent à permettre un plus grand transfert de risques et des charges, les concepteurs-assembleurs de systèmes complets cherchent à les appliquer à leurs propres sous-traitants, dit alors de second niveau.
- *Les sous-traitants de second niveau.* Ce sont des fournisseurs d'équipements pour systèmes complets, qui ont une compétence reconnue dans la production, mais sans pour autant développer de grandes capacités d'études. On parle alors de sous-traitance globale de production dans le sens où les activités de recherche et de développement ne sont pas déléguées. A terme, ils inter-agiront uniquement avec les sous-traitants de premier niveau, mais conserve à l'heure actuelle quelques liens avec le donneur d'ordres principal : l'avionneur.
- *Les sous-traitants de troisième niveau.* Ce sont généralement des sous-traitants de faible capacité travaillant à la commande. C'est une sous-traitance classique et conjoncturelle. Ils sont généralement en contact avec les donneurs d'ordres des niveaux un et deux, et rarement avec l'avionneur. L'avionneur conserve toutefois la maîtrise de ce dernier puisque chaque société doit recevoir un agrément avant d'entrer en relation avec les sous-traitants de premier et second niveaux.

Selon ce découpage, l'avionneur, en tant que donneur d'ordres, peut être considéré comme un architecte-externalisateur du programme. Il décompose le produit en unités pouvant être développées ou produites par différentes composantes de l'organisation mais en externalise certaines autres vers son réseau de sous-traitance. Son objectif est donc d'effectuer un découpage pertinent du produit et de s'assurer de la qualité des travaux externalisés afin que l'intégration finale du produit soit possible.

3.5.3 L'entreprise étendue et le développement d'un nouvel avion

Si l'on se focalise sur le processus de développement d'un nouvel avion, cette configuration en entreprise étendue soulève de nombreuses problématiques. En effet, la coordination⁹ des activités de développement de sous-systèmes participant à la réalisation d'une ou plusieurs fonctions associées à un ou plusieurs ensembles de l'appareil ou du produit final implique :

- la définition de procédures de travail et d'échanges partagées,
- la mise en œuvre d'outils de développement communs,
- la synchronisation des activités afin qu'une industrialisation soit possible,

⁹ Nous nous appuyons sur la définition de Martin qui définit la coordination comme un « acte permettant aux individus de travailler harmonieusement ensemble » [MAR01].

- la mise en place d'un référentiel informationnel commun afin que l'ensemble des acteurs puisse accéder à des informations correctes et à jour,
- la gestion des interfaces entre les systèmes dont le développement a été confié à des partenaires ou des sous-traitants différents,
- la supervision d'activités de développement qui peuvent être en partie gérées par l'intermédiaire de contrats.

Dans la pratique, l'influence de l'organisation en entreprise étendue sur les modes de conception a conduit à l'introduction des principes d'ingénierie concourante (simultanéité) et au développement de nouveaux produits par des équipes distribuées.

4 Le développement simultané et distribué d'un nouvel avion

La norme AFNOR X50-127 spécifie qu'en « partant des besoins, le processus de conception définit pas à pas le produit qui doit répondre aux besoins et aux attentes, par des choix successifs portant sur des points de plus en plus détaillés » [AFN02]. Toutefois, comme le précise Darses et al. dans [DAR00], il n'existe pas de chemin prédéterminé entre l'expression des besoins et la spécification de la solution. Même s'il est possible de s'appuyer sur des méthodologies et des procédures robustes ainsi que sur des expériences passées.

Ainsi, le processus de conception n'est pas déterministe mais vise plutôt à établir un cadre de travail permettant de piloter l'intervention des concepteurs et à maîtriser leurs interactions tout en respectant un planning. C'est dans ce cadre que les concepteurs mettent en œuvre leurs connaissances, des procédures et des méthodologies.

Si les processus séquentiels de conception ont, à une certaine période, permis de répondre aux besoins du marché, les modèles de conception issus de l'ingénierie concourante permettent aujourd'hui d'aborder les défis actuels du marché aéronautique civil.

4.1 Ingénierie Concourante : Principes et Application dans l'Industrie Aéronautique

A la fin des années 80, c'est dans l'industrie automobile que commencent à se dessiner les premiers grands principes de l'ingénierie concourante (ou concurrent engineering dans le monde anglo-saxon). Cette mise en évidence est due à l'analyse comparative, notamment par Clark et al. [CLA87], des processus de développement de nouveaux produits chez les constructeurs automobiles américains, européens et japonais afin d'expliquer les succès de ces derniers. Une partie de ces travaux ont participé au succès de l'ouvrage de Womack et al [WOM87] « The Machine That Changed the World » qui proposait pour la première fois un modèle d'organisation et de gestion de projet se positionnant comme une alternative aux principes traditionnels de l'ingénierie séquentielle et « cloisonnée ».

Si cet ouvrage fait apparaître au grand jour de nouvelles tendances d'organisation et de gestion de projets de développement, l'industrie militaire américaine avait déjà fait apparaître au début des années 80 des concepts liés à la gestion des informations dans les projets de développement qui deviendront des principes fondamentaux pour le développement d'applications informatiques servant l'ingénierie concourante. Cette initia-

tive baptisée CALS¹⁰, portée par l'Institute of Defense Analysis (IDA) du département de la Défense (DoD – Department of Defense) propose une stratégie régissant la gestion et l'échange des données informatisées (dossiers d'études, de fabrication, de maintenance, etc.) entre les intervenants d'un programme militaire. L'objectif de cette stratégie était d'améliorer la gestion des flux d'informations entre les acteurs d'un même programme et, par conséquent, de promouvoir indirectement le déroulement concourant d'activités. L'innovation, proposée dans le cadre de l'initiative CALS, tient à la mise en œuvre de systèmes informatiques intégrés pour la conception, le calcul et la simulation, ainsi que de systèmes d'échanges et de gestion des données permettant l'accès de tous les acteurs aux informations relatives au projet. CALS traitait donc des aspects liés aux technologies de l'information, avec la définition de standards d'échange, pour ensuite élargir son champ d'analyse aux aspects méthodologiques et organisationnels.

4.1.1 Définition de l'ingénierie concourante

En 1988, l'IDA [IDA88] propose le concept de Concurrent Engineering comme une approche méthodologique qui intègre le développement simultané des produits et des processus associés, incluant, la fabrication et le soutien logistique. Cette approche prend en considération, dès le démarrage du projet, le cycle de vie du produit, depuis sa conception jusqu'à son exploitation en incluant la qualité, les coûts, la planification et les besoins des utilisateurs. Cette définition est largement empreinte des problématiques militaires. C'est pourquoi «soutien» est remplacé par «maintenance» dans un certain nombre d'ouvrages.

En 1994, L'AFNOR a quant à elle choisi de privilégier le terme d'ingénierie intégrée qu'elle définit dans [AFN94] comme une «*démarche qui consiste à prendre en compte simultanément les besoins relatifs à différents moments du cycle de vie du produit*». Cette approche implique une conception intégrée et simultanée des produits et des processus liés à ces derniers, ce qui inclut la production et le soutien. Elle permet aux développeurs de prendre en compte, dès l'origine, tout le cycle de vie du produit, depuis la première expression du besoin jusqu'au retrait de service ».

L'élément important qui transparaît de ces deux définitions est l'intégration, dès la conception du produit, des contraintes liées aux diverses phases de son cycle de vie. Toutefois, cet élément ne doit pas cacher l'ensemble des principes que met en évidence le concept d'ingénierie concourante.

4.1.2 Principes

L'adoption des principes de l'ingénierie concourante par une entreprise est principalement liée aux enjeux auxquels toute organisation industrielle doit aujourd'hui faire face. Le premier enjeu est lié à la concurrence que se livrent les entreprises sur les marchés et des facteurs de compétitivité qui en découlent. Si l'on prend en compte l'exemple de l'industrie aéronautique, dont les clients principaux sont les compagnies aériennes, ces facteurs sont :

- l'introduction d'éléments innovants dans la conception de nouveaux appareils ou sur des appareils déjà en service. Dans ce cas c'est le lien entre la compétitivité et l'innovation qui est mis en avant,

¹⁰ CALS qui à l'origine signifie Computer Aided Acquisition and Logistics et devenu par la suite Continuous Acquisition and Logistic Support.

- le rythme d'introduction de nouveaux produits sur le marché afin de répondre aux attentes des compagnies. Un rythme d'introduction élevé de nouveaux produits sur une période donnée confèrera à un constructeur une position privilégiée vis à vis des concurrents sur certaines niches du marché.

Face à ces enjeux et par rapport aux deux définitions évoquées précédemment, il est possible d'envisager l'articulation des principes de l'ingénierie concourante autour de trois grands axes très fortement corrélés.

Le premier axe concerne l'organisation et la gestion des processus de développement ainsi que l'ordonnancement des tâches de conception. Dans un processus de développement traditionnel, les processus et les tâches se déroulent de manière séquentielle. La clôture d'une tâche implique donc le démarrage de l'activité suivante. Un des concepts essentiels de l'ingénierie concourante est la parallélisation des tâches et des processus. Cette démarche implique de pouvoir gérer les dépendances informationnelles entre les tâches. Ainsi, une tâche aval peut démarrer lorsque les informations produites par une tâche amont sont jugées suffisamment matures alors même que cette dernière n'est pas clôturée. Un tel dispositif impose donc de savoir gérer le chevauchement des tâches et par conséquent les itérations de conception auxquelles peuvent être rattachés des concepts de maturité [TER97]. Si un degré d'incertitude est fortement présent avec ce type de gestion, l'avantage certain qu'elle présente est lié à la diminution du nombre de modifications à traiter dans le processus de développement.

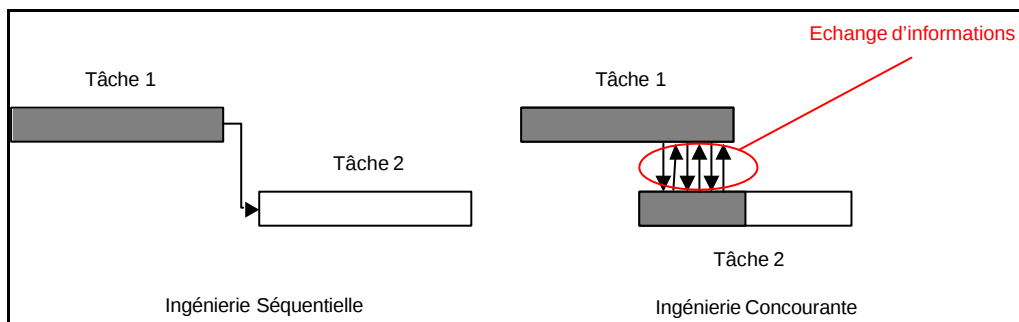


Figure 9 : Comparaison des modèles d'ordonnancement en Ingénierie Séquentielle et en Ingénierie Concourante

Le pilotage des processus de développement organisés sur le modèle de l'ingénierie concourante repose donc sur l'ordonnancement des tâches, la coordination des acteurs ainsi que sur l'échange d'informations. Ce dernier point concerne à la fois les acteurs du développement mais aussi ceux impliqués dans d'autres phases du cycle de vie du produit puisque ces contraintes doivent être exploitées dès la conception du produit.

Le second axe remet en cause les structures organisationnelles mises en place dans les projets de développement. Une bonne coordination des processus et des échanges informationnels de qualité étant gages de succès de tout projet d'ingénierie concourante, il est préférable de se défaire de la structure de projet verticale traditionnelle afin de privilégier des équipes plus autonomes aux compétences transverses. C'est dans cette perspective qu'ont été mis en place les «plateaux projets» qui permettent de réunir, dans un même lieu, l'ensemble des acteurs ayant à intervenir dans le développement d'un nouveau produit. Dans ce contexte, l'efficacité de ces acteurs et les performances du projet ne peuvent être garanties que si un pouvoir de décision suffisant est

alloué aux responsables du projet et si des processus de support dédiés au plateau sont mis en place.

Enfin, le troisième axe se rapporte à la mise à disposition d'un outil unique permettant de garantir la cohérence des informations manipulées lors de la conception tout en fédérant l'ensemble des points de vue¹¹ impliqués dans le processus. Cette problématique est aujourd'hui en partie couverte par le développement des systèmes d'information « produit » et par l'intégration des outils de GDT (Gestion des Données Techniques)¹².

Comme le souligne Françoise Darses dans [BOS97], « *un des atouts de l'ingénierie concourante est de proposer un modèle organisationnel plus valide au regard des processus cognitifs qui sous-tendent les activités de conception* ». En particulier parce que le modèle proposé prend en compte au plus tôt les contraintes auxquelles le produit en cours de conception devra répondre, parce que la décomposition du problème sous-entend également la construction de la solution et, enfin, parce que ces solutions sont élaborées par simultanéité des points de vue. D'un point de vue stratégique, ces seuls arguments cognitifs ne suffisent pas à justifier l'implantation de ces concepts dans l'industrie où prévalent plutôt les critères de performance du développement.

4.1.3 Application dans l'industrie aéronautique : implications et résultats

Si l'on se réfère à l'expérience du constructeur européen AIRBUS, il est possible de voir les avantages que procurent ces concepts dans les faits. En 1997, pour le développement des versions 500/600 de l'AIRBUS A340, ce constructeur décide de sortir d'une organisation basée sur les activités pour promouvoir une organisation plus orientée vers le produit en lançant le projet ACE (Airbus Concurrent Engineering). Ce projet, au travers de l'intégration des concepts de l'ingénierie concourante, visait initialement à diminuer les temps et les coûts de développement mais aussi à diminuer les temps de mise au point tout en garantissant une plus grande fiabilité du produit lors de son entrée en service. L'introduction de ces concepts s'est articulée autour des principes suivants [PAP01] [SCH02a] :

- la mise en place d'une structure de gestion forte dirigée par le programme,
- la parallélisation des sous-processus ainsi que la standardisation des tâches de conception répétitives,
- la mise en place d'équipes intégrées (conception, fabrication et soutien) avec des responsabilités communes et localisées sur un même plateau (jusqu'à 600 personnes toutes équipes et disciplines confondues). L'intégration de ces équipes a notamment permis d'assurer plus de cohérence entre les processus tout en favorisant leur flexibilité notamment grâce à une plus grande anticipation des décisions,
- l'intégration des sous-traitants dans ces équipes avec la définition d'un partage des responsabilités,
- la définition de procédures et de méthodes ainsi que de bases de données communes à l'ensemble de ces équipes,
- la définition d'un planning de développement articulé autour de jalons principaux qui, quand ils sont atteints, donnent lieu à une revue de projet. Ces revues ne

¹¹ Nous entendons ici par « point de vue », la représentation du produit que ce fait un métier donné.

¹² La gestion des données techniques se fait au travers de Systèmes de Gestion de Données Techniques (SGDT). Aujourd'hui, il est plus souvent fait référence à ces outils sous les termes de PDM (Product Data Management) ou PLM (Product Lifecycle Management).

visent pas à établir l'avancement des activités mais l'avancement de la conception du produit par rapport à des configurations (« baselines ») de référence,

- la définition d'un système d'information produit unique et partagé par l'ensemble des acteurs du projet. La mise en place de ce système d'information produit a favorisé l'échange et la communication entre les acteurs ainsi que le développement d'outils PDM et CAO communs. Un tel système d'information a également autorisé la réconciliation (homogénéisation) des données produites permettant ainsi le développement de la maquette numérique dont la composante graphique ne constitue que la partie émergée de l'iceberg informationnel.

Dans le développement de la version 500/600 de l'A340, l'introduction de ces concepts a permis de réduire les temps de conception de 25% par rapport à la version A340 de base et de 15% par rapport à l'A320. Cette réduction a, en partie, contribué à la diminution des coûts de développement de 30% par rapport à l'A340, ce qui représente pour AIRBUS une économie de 50 M€. A l'entrée en service du premier appareil, la fiabilité du produit était de 99%. Mais l'un des plus grands succès de ce projet est d'avoir contribué à l'intégration des partenaires de ce constructeur jusqu'alors représenté par plusieurs entités.

Aujourd'hui les acquis de ce projet bénéficient au développement de l'A380 surtout au travers de la mise en place des outils CAO et PDM qui permettront de garantir la cohérence de la conception et de maîtriser la complexité de ce produit.

4.2 Le développement d'un nouvel avion

Lors du développement d'un nouvel avion, les acteurs impliqués dans le programme interviennent simultanément (Cf. Figure 10) selon les objectifs qui ont été assignés à leurs filières. Une filière regroupe un ensemble de métiers dédié à une phase précise du cycle de vie du produit ou spécialisé selon un type de sous-ensemble du produit. Ce découpage permet d'identifier des réseaux de compétences et de connaissances selon chaque phase du cycle de vie du produit et d'identifier les informations manipulées par les acteurs du programme. Ces filières sont les suivantes :

- « Comportement Général Avion ». Elle regroupe les équipes d'avant-projets qui proposent les concepts pour la définition des nouveaux avions et analysent leurs répercussions sur la mécanique du vol (aérodynamisme, performances, charges, aéroélasticité, résistance des structures, acoustique, etc.).
- « Système ». Elle regroupe tous les métiers qui étudient et mettent en œuvre les systèmes de l'avion.
- « Structure / Installation Système ». Elle rassemble les métiers participant à la définition de la structure de l'avion et à l'allocation d'espaces pour les systèmes dans cette structure.
- « Assemblage » : Elle regroupe l'ensemble des métiers qui interviennent dans l'intégration finale du produit. Elle utilise les résultats des activités menées par les filières industrielles.
- « Filières industrielles ». Elle est dédiée à la fabrication et à l'approvisionnement de pièces élémentaires mais aussi des outillages. Elle fait également intervenir des métiers tels que la peinture ou le câblage.
- « Filières de support » : Elle s'assure de la prise en compte des exigences de soutien au cours des phases de développement mais aussi de la production des éléments de soutien (outillage, rechanges, documentation).

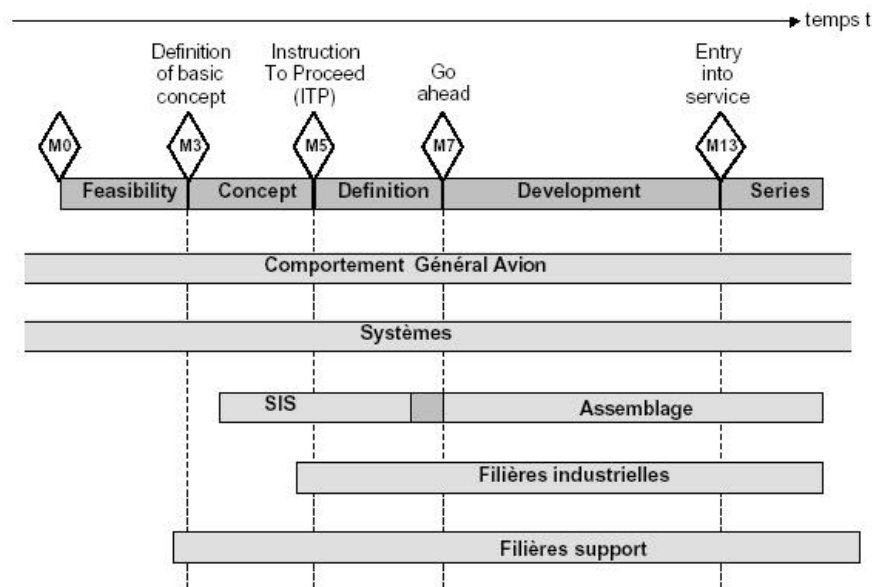


Figure 10 : Intervention des filières dans un programme Avion [AIR02]

Si ces filières peuvent être dissociées, leurs interventions se déroulent néanmoins simultanément. Même si toutefois certaines interactions entre filières sont privilégiées. Par exemple, la filière « Structure / Installation Système » n'interviendra qu'une fois que les concepts préliminaires auront été validés par la filière « Comportement Général Avion ».

Si une partie de ces filières intervient tout au long du cycle de vie du produit, nous nous limiterons dans nos travaux aux phases qui s'étendent de la conception (Jalon M3) à l'entrée en service du premier appareil, c'est-à-dire la fin de la phase de développement (Jalon M13).

4.2.1 Phase de conception

La phase de conception débute après la clôture de la phase de faisabilité et comprend deux sous-phases importantes détaillées ci dessous.

4.2.1.1 Optimisation des concepts au niveau de l'avion (Jalons M3-M4)

L'objectif de cette phase est d'optimiser et d'affiner les concepts définis pour l'avion global afin de faire émerger une première configuration de l'avion en cours de développement. Avec cette première configuration, il devient possible d'amorcer des contacts avec des compagnies clientes potentielles ainsi qu'avec les fournisseurs majeurs. Ainsi, à l'issue de cette phase, les activités suivantes auront été réalisées :

- veille sur l'environnement opérationnel dans lequel le futur produit est destiné à être utilisé et recueil de l'opinion des compagnies clientes potentielles,
- approfondissement des spécifications au niveau le plus élevé du produit,
- optimisation des concepts liés aux ensembles majeurs,
- définition de la première configuration de référence du produit (Product Definition Level 0),
- établissement des premières relations avec les fournisseurs potentiels,

- assurance de la disponibilité et de la maturité des technologies dont l'usage est envisagé.

4.2.1.2 Consolidation de la configuration de référence en conception (Jalons M4-M5)

Cette phase a pour objectif d'enrichir les concepts techniques associés à la première configuration de référence en y associant des informations relatives au marketing, à la production, à la maintenance, au soutien, à la certification, aux coûts et au recyclage du futur produit. Elle vise aussi à détailler les spécifications, définir les risques associés au projet, établir le partage des tâches entre entités de l'organisation afin de pouvoir entreprendre une définition technique du produit. Lors de cette phase, les activités suivantes auront été menées à terme :

- définition du partage des tâches,
- définition des plannings du projet,
- approbation des coûts récurrents et non-récurrents,
- Mise à disposition de la seconde configuration de référence (Product Definition Level 1),
- Allocation des ressources et des budgets jusqu'au jalon M7,
- Approbation des concepts de fabrication,
- Définition de l'infrastructure opérationnelle.

4.2.2 Phase de définition

Pendant cette phase le produit passe du stade de concepts détaillés au stade d'un produit complètement défini par des plans et des modèles. Elle comporte également deux sous-phases :

4.2.2.1 Finalisations des spécifications et des propositions commerciales (Jalons M5-M6)

A ce stade du cycle de vie du produit, les spécifications complètes du futur appareil sont disponibles, les propositions commerciales sont finalisées et les premières évaluations financières des fournisseurs majeurs doivent être disponibles. Parallèlement, les activités suivantes sont réalisées :

- élaboration du planning détaillé de définition,
- apport d'une garantie de performances par rapport aux concepts proposés.

4.2.2.2 Définition des composants (Jalons M6-M7)

Entre ces deux jalons, la définition détaillée du produit physique est réalisée ainsi que sa simulation fonctionnelle jusqu'aux composants élémentaires. De plus, au cours de cette phase le financement des phases amonts (développement et production – jalons M7 à M14) est réalisé. Les contrats avec les compagnies clientes de lancement sont signés. De la même manière que pour les autres phases, d'autres activités sont réalisées durant ce laps de temps comme :

- mise à disposition de la définition du produit (Product Definition Level 2),
- arrêt des décisions relatives à la réalisation en interne des composants ou à leur sous-traitance vers l'extérieur,
- définition des financements et des plannings pour la phase de développement du premier appareil.

4.2.3 Phase de développement¹³

Dans l'industrie aéronautique, la phase de développement correspond à la production, l'assemblage et aux tests du premier appareil. Elle permet de préparer la production en série du nouvel avion. Toutefois, la phase de développement proprement dite se déroule des jalons M7 à M13. Même si elle ne contribue pas véritablement à la définition du produit, les acteurs impliqués dans cette phase sont parmi les clients de la phase précédente. De nombreuses itérations sont donc déclenchées entre ces deux phases.

4.2.3.1 Initialisation de la fabrication (Jalons M7-M8)

A ce stade, les standards de fabrication sont élaborés afin de permettre la fabrication du premier appareil (à l'exception des composants qui nécessitent des délais de production élevés et dont la fabrication débute plus tôt, comme le tronçon central 15/21 par exemple). Par conséquent les nomenclatures ainsi que les processus de production sont définis, de même que les outillages et les montages d'usinage. La réalisation de cette phase est jugée terminée lorsque :

- la définition du produit orientée production (Product Definition Level 3) est mise à disposition,
- les sites de production se préparent au lancement de la fabrication,
- les prototypes de systèmes sont disponibles,
- le programme de certification de l'appareil est établi.

4.2.3.2 Fabrication des composants, Assemblage et tests des section équipées (Jalons M8-M9)

Au cours de cette phase, les composants élémentaires sont fabriqués et les différentes sections de l'appareil sont assemblées par les sites de production de l'entreprise. Des tests fonctionnels sont ensuite réalisés au niveau de chaque section avant leur livraison sur la chaîne d'assemblage finale (FAL – Final Assembly Line) selon les plannings établis. Parallèlement, les séquences d'assemblage ainsi que les capacités et les règles opérationnelles sont définies en vue de l'assemblage final du produit.

4.2.3.3 Assemblage final (Jalons M9-M10)

Lorsque les chaînes d'assemblage ainsi que les outillages sont disponibles, l'assemblage des différentes sections peut commencer sur la FAL où la motorisation est également intégrée. A partir de cet assemblage, les différents systèmes de l'avion sont connectés et testés afin de s'assurer du bon fonctionnement de systèmes participant aux commandes de vol de l'appareil. Ce dernier est ensuite partiellement équipé pour les vols d'essais et la procédure de tests au sol est disponible avant que le premier appareil soit délivré au centre de tests.

4.2.3.4 Tests au sol et préparation du premier vol (Jalons M10-M11)

A l'issue de cette phase, l'appareil est prêt pour son premier vol, avec quelques limitations, afin de s'assurer de la sécurité des opérations. Pour cela, l'ensemble des tests fonctionnels et au sol a été effectué ainsi que l'ensemble des tests de sécurité. De plus, des équipements et des systèmes d'urgence sont installés sur l'appareil afin de garantir la sécurité de l'équipage en cas de défaillance d'un des systèmes vitaux de l'avion pendant les essais.

¹³ Par abus de langage, le terme « développement » que nous employons dans nos travaux fait référence aux phases de conception, définition et développement sauf quand il est fait mention du contraire.

4.2.3.5 Passage de la certification de type et vérification de la conformité par rapport aux spécifications standards (Jalons M11-M12)

Après une campagne d'essais en vol, la certification de type peut être demandée aux autorités (Cf. partie 2.1 du chapitre 2). Pour que ce certificat soit attribué, le constructeur doit fournir un dossier complet contenant : les documents de production et les procédures d'inspections, ainsi que les manuels techniques, de maintenance et de réparation. A l'issue de cette phase :

- les spécifications standards de l'appareil sont disponibles,
- les résultats des essais en vol sont utilisés pour consolider la configuration basique de l'appareil,
- l'ensemble de la documentation est disponible en vue de la certification de l'appareil,
- la maintenabilité de l'appareil est démontrée,
- l'appareil est certifié par les autorités.

L'avancement des différentes phases du processus de développement d'un nouveau produit repose en partie sur l'évolution, la négociation, puis la validation des modèles décrivant l'artefact en cours de conception. Ils sont considérés comme des supports informationnels au centre de la collaboration entre les acteurs de l'entreprise étendue. Nous décrivons les plus remarquables ci-après.

4.3 Des supports informationnels pour le développement de produits en ingénierie concourante

Lors du développement d'un nouvel avion, de nombreux modèles sont utilisés pour décrire la configuration du produit à un instant de son cycle de vie selon un point de vue particulier (Cf. Figure 11). Ces modèles constituent une partie du patrimoine informationnel du produit qui devra être géré en configuration notamment pour les métiers de l'ingénierie.

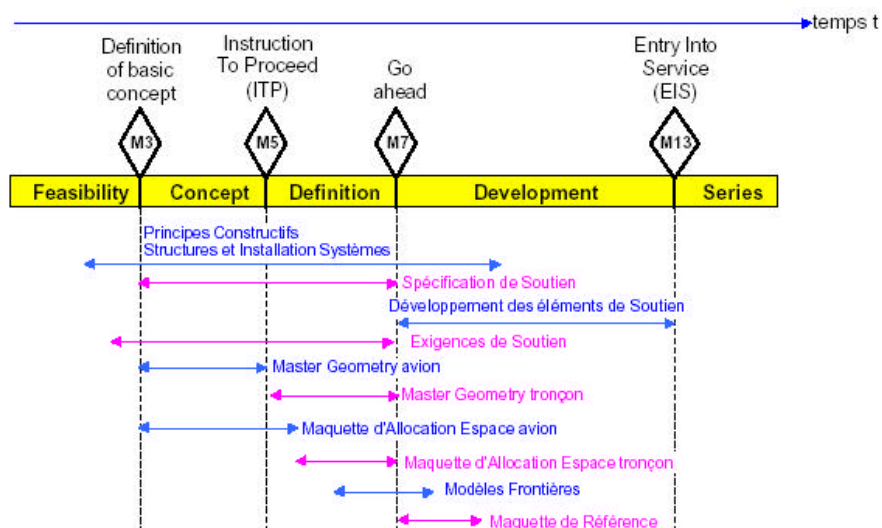


Figure 11 : Modèles du produit générés et manipulés lors du développement d'un nouvel Avion

4.3.1 Formalisation des solutions techniques potentielles (les principes constructifs)

Il existe souvent plusieurs solutions à un problème donné. Les principes constructifs servent à proposer plusieurs solutions à chaque problème, afin de retenir la solution optimale des points de vues techniques et économiques. Il existe deux types de principes constructifs, les principes constructifs génériques et les principes constructifs spécifiques dédiés à un programme donné. Les principes constructifs génériques peuvent être divisés en trois groupes :

- *Ceux relatifs aux technologies utilisées* : matériaux, techniques d'assemblage.
- *Ceux relatifs à l'architecture du produit* : étude des réglementations de certification, position des principaux sous-ensembles (trains d'atterrissage, ailes, moteurs, etc.).
- *Ceux relatifs à la conception détaillée* qui fournissent la géométrie des composants sans dimensions spécifiques.

Les principes constructifs sont essentiellement des plans d'étude d'une zone, réalisés en CAO. Selon l'avancement du projet et des éléments disponibles, les principes constructifs peuvent être des dessins 2D (études d'écoulement) ou des modèles 3D (études de cheminement). Selon le métier des acteurs, ces modèles peuvent être utilisés de différentes manières, ainsi :

- les *métiers « Conception / Etudes »* les utiliseront principalement pour la modélisation des éléments ou des modes d'assemblage,
- les *métiers de l'industrialisation* les utiliseront pour analyser les solutions mais aussi pour identifier ainsi que pour figer les pièces à longs cycles de fabrication et prévoir les approvisionnements,
- le *programme* les utilisera quant à lui pour valider les solutions choisies.

4.3.2 Spécifications des équipements avec allocation d'espace (Structures et Installations systèmes)

Ces spécifications sont en fait deux documents : la spécification d'installation du système et le dossier d'installation. Le premier document est un contrat passé entre le concepteur du système responsable d'un équipement et les installateurs. Il définit les volumes préliminaires ainsi que les critères généraux et spécifiques de l'équipement. Ce document est rédigé par le concepteur du système et sert de point de départ à l'établissement de la maquette de l'équipement. Le dossier d'installation est quant à lui rédigé par le concepteur de la maquette de l'équipement. Il contient :

- les allocations d'espace de l'équipement et de son environnement (accessibilité, maintenabilité, etc.),
- le plan d'encombrement de l'équipement,
- le plan frontière avec les chaînes de côtes,
- le plan contractuel de l'équipementier retenu,
- les configurations de l'équipement pour les essais en vol.

Ainsi, on distinguera quatre acteurs principaux manipulant ces types de modèles lors du développement d'un équipement :

- Le *concepteur du système* qui est responsable des spécifications d'un équipement. Le rôle de cet acteur est de :

- s'assurer des choix de base de la conception de l'équipement conduisant à l'encombrement préliminaire,
 - coordonner les activités de maquettage entre le concepteur de la maquette de l'équipement, les installateurs des systèmes et les équipementiers,
 - valider l'installation de l'équipement.
- *Le concepteur de la maquette de l'équipement. Il doit :*
 - réaliser la maquette 3D relative à l'installation de l'équipement à partir de la spécification de d'installation,
 - étudier et proposer des solutions d'installation,
 - résoudre avec les autres intervenant dans la même zone, les problèmes d'installation (interférences, garde, etc.).
 - *L'installateur système* qui maquette les canalisations hydrauliques, les harnais électriques, les commandes mécaniques, etc... attenantes à l'équipement.
 - *L'installateur structure* doit quant à lui, maquetter la structure dans la zone où se monte l'équipement.

4.3.3 *Prise en compte des exigences de soutien dans le développement d'un appareil*

L'idée de cette démarche est d'exprimer, de manière efficace et complète, pendant les phases de conception préliminaires, les contraintes et les exigences des compagnies clientes pour le soutien du futur avion. Elle permet aux compagnies clientes de s'assurer que le produit qui leur sera livré aura une disponibilité maximale, sera économique à exploiter et à entretenir tout en respectant les impératifs de sécurité. La capture de ces exigences et de ces contraintes prend la forme de spécifications qui pourront être exploitées par les métiers de l'ingénierie.

4.3.4 *Définition des formes et des référentiels du produit (Maquette Master Geometry)*

La maquette «Master Geometry» est développée pour avoir une vision d'ensemble des références théoriques de l'avion. C'est la référence officielle en matière de profils extérieurs, de références géométriques et de géométrie. Par conséquent, elles regroupent toutes les formes externes de l'avion, les références géométriques principales (référence des cadres, des lisses, des nervures et longerons, points d'interface importants, etc.) ainsi que tous les repères associés. Ces éléments de référence sont réalisés en mode filaire ou surfacique. Puisqu'elle définit les références de l'avion, cette maquette peut être utilisée par un grand nombre d'acteurs du processus de développement comme les aérodynamiciens, les concepteurs de structures, les outilleurs, etc.

4.3.5 *Allocation des espaces pour la définition des composants (Maquette d'allocation d'espace)*

La maquette d'allocation d'espace est créée dans le but d'avoir une vision globale de l'avion représenté par des volumes simplifiés. Elle représente donc un avion complet théorique avec sa structure et ses systèmes selon une représentation homogène (solide simplifié) à partir des solutions proposées dans les principes constitutifs.

Les maquettes d'allocation d'espace peuvent être utilisées par différents métiers :

- Les métiers « *Conception / Structure* » afin de :
 - représenter, en volumique simplifié, les pièces essentielles de la structure (enveloppe principale) ;
 - définir les bases des interfaces.
- Les métiers « *Conception / Installation Systèmes* » afin de :
 - pré-étudier l'ergonomie : ergonomie du poste de pilotage, accès aux équipements, etc...,
 - pré-étudier rapidement certaines modifications,
 - pré-implanter les « gros volumes systèmes » en intégrant les règles de ségrégation des circuits et leurs différentes propriétés physiques,
 - vérifier les interférences éventuelles entre les différents systèmes,
 - pré-implanter, sous-forme simplifiée, les principaux cheminements (électrique, hydraulique, pneumatique).
- Les métiers *rattachés à l'ingénierie de soutien* afin de :
 - valider les objectifs de soutien logistique,
 - simuler les tâches de maintenance (dépose, entretien courant).
- Les métiers *rattachés à l'industrialisation* afin de simuler les découpages en tronçons possibles pour étudier les outillages d'assemblage final.

Les maquettes d'allocation d'espace est généralement validée au cours de réunions appelées « revues de conception ».

4.3.6 La gestion des interfaces (les modèles frontières)

Un modèle frontière définit les responsabilités aux frontières entre deux sections de l'appareil placées sous la responsabilité de deux unités différentes de l'organisation. Ces modèles peuvent être considérés comme des contrats entre deux unités de l'organisation. Ils sont donc utilisés comme références pour la validation des définitions, comme support pour la définition de l'industrialisation et comme références pour l'analyse des problèmes d'assemblage. Pour être utilisables efficacement lors du développement, les modèles frontières doivent contenir un certain nombre d'informations dont :

- les exigences fonctionnelles finales du produit,
- la conception détaillée au niveau de la frontière (principes constructifs détaillés),
- le partage des responsabilités,
- les référentiels physiques (accessibles à la mesure après assemblage),
- les dimensions fonctionnelles des différents lots constituant l'avion,
- le partage des tolérances,
- les provisions pour le perçage, l'assemblage, etc.,
- la définition de l'espace réservé pour le montage et le démontage des pièces de rechange (dimensions clés),
- les pièces réglables et les valeurs de leurs jeux le cas échéant.

4.3.7 Représentation de l'avion défini au travers de la maquette de référence géométrique et du dossier de définition

L'avancement du produit dans sa phase de définition conduit à remplacer les modèles préliminaires représentés par la maquette d'allocation d'espace par des modèles de pièces définitifs. Cette représentation avancée du produit est appelée la maquette de référence géométrique. Elle fournit une représentation géométrique :

- des pièces élémentaires (modèles de pièces permettant l'élaboration des plans de pièces),
- des ensembles (avec l'arbre permettant la représentation des plans d'ensemble).

Une fois validée, la maquette de référence géométrique constitue le référentiel géométrique du dossier de définition. Un dossier définition est préparé pour chaque exemplaire d'avion par le bureau d'étude en vue de sa fabrication et de son assemblage. Pour être exploitable, il doit contenir trois « liasses »¹⁴ ainsi que l'ensemble des modifications qui ont été apportées à cet exemplaire. Ces liasses sont :

- *La liasse mécanique.* Elle fournit la définition mécanique de l'ensemble des pièces élémentaires ainsi que des assemblages accompagnés de leurs nomenclatures. Elle différencie également les pièces standards des pièces non-standards et fournit des indications quant à l'installation des divers items.
- *La liasse électrique.* Elle fournit la définition de l'ensemble des systèmes, des installations et des circuits électriques. Elle contient donc également la définition de l'ensemble des harnais, des câbles, des relais et des blocs terminaux. Les plans qu'elle contient sont donc des diagrammes de principes et de câblages complétés de la liste du matériel utilisé.
- *Les références des équipements (achetés, sous-traités, etc...) devant être installés sur le produit.*

Le développement du produit par la création et le raffinement successif et collaboratif des modèles implique la définition et le déploiement d'une stratégie de gestion du patrimoine informationnel du produit.

4.4 Gestion du patrimoine informationnel du produit

Le développement des différents ensembles d'un avion peut être placé sous la responsabilité de plusieurs entités de l'entreprise étendue. Pourtant, l'avionneur doit s'assurer de la cohérence de ces développements en vue de l'intégration finale du produit. Une des stratégies dont il dispose afin de s'assurer de l'atteinte de ces objectifs est de développer et entretenir une vision d'ingénierie centrée sur le produit.

Cette vision basée sur une représentation de la décomposition du produit, du produit final jusqu'aux composants élémentaires, permet à l'avionneur d'associer à chaque item de la structure : la responsabilité d'une entité, des processus et enfin des modèles qui le décrivent. Mais cette vision ne peut pas se limiter à un aspect statique car elle doit également représenter l'évolution du patrimoine informationnel du produit à tout moment de son cycle de vie.

¹⁴ On notera ici l'usage de ce terme issu d'une période où le produit était défini au format papier.

La mise en place d'une telle structure et des mécanismes qui en découlent doit normalement permettre à l'avionneur de :

- superviser l'avancement du processus de conception d'un produit complexe,
- garantir aux concepteurs, un accès à des informations cohérentes et à jour,
- vérifier l'adéquation du produit en cours de conception avec les attentes des clients (internes et externes),
- permettre et contrôler l'enrichissement du patrimoine informationnel du produit au fil du temps.

Comme nous le verrons dans le chapitre 2, l'ensemble de ces mécanismes font partie d'une discipline voire d'une méthode appelée : gestion de configuration.

5 Conclusions

L'analyse du contexte de ces travaux, l'industrie aéronautique civile, a mis en évidence la complexité du produit et du projet de développement duquel il est indissociable. Sur un marché sensible aux variations de l'environnement économique et faisant l'objet d'une compétition exacerbée, les constructeurs doivent mettre à profit leurs expériences et l'ensemble des compétences dont ils disposent afin d'introduire de nouveaux appareils sur le marché tout en préservant leurs marges de profits.

Si ce défi soulève de grandes problématiques techniques, il a également des impacts sur la configuration des organisations. Les processus de développement et de fabrication d'un nouvel appareil reposent sur un véritable réseau de partenaires et de sous-traitants animés par les constructeurs. L'organisation des constructeurs en entreprises intégrées a donc cédé la place à l'entreprise étendue. Une telle configuration des organisations implique la définition de nouveaux rôles pour les acteurs de cette industrie, le plus remarquable restant celui du donneur d'ordres qui peut être considéré comme un « architecte-intégrateur-externalisateur ».

Cette nouvelle configuration des organisations aéronautiques et leurs motivations pour le développement de produits innovants, plus performants, avec une réduction de leurs coûts d'acquisition ont également conduit à revoir l'ordonnancement des processus de développement. L'introduction des méthodes liées à l'ingénierie concourante dans les processus de développement a permis de tirer profit de la collaboration entre les diverses entités de l'organisation. Dans la pratique, la collaboration entre les acteurs peut être observée lors de l'enrichissement successif des modèles du produit. L'enrichissement cohérent et performant ne devient possible que lorsque des mécanismes de gestion du patrimoine informationnel du produit sont définis. C'est le but de la gestion de configuration dont nous détaillons les grands principes dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Gestion de la configuration de produits complexes en cours de développement

1 Introduction

Le contexte, décrit dans le chapitre précédent, permet à présent d'appréhender les difficultés liées à la gestion des modifications lors du développement d'un nouvel appareil. Il serait toutefois dangereux de considérer cette activité comme une composante du processus de conception. En effet, celle-ci s'inscrit dans une démarche plus large de construction et de maîtrise du produit et de son patrimoine informationnel au cours de leurs cycles de vie respectifs. Il est plus souvent fait allusion à cette démarche sous le nom de processus de gestion de configuration.

Dans ce chapitre, nous examinons, dans un premier temps, les fondements historiques de cette démarche ainsi que les objectifs et les enjeux organisationnels auxquels elle tente d'apporter une réponse. Nous détaillons ensuite les activités qui la compose et notamment la gestion des modifications. Avant de préciser le périmètre de nos travaux, nous présentons les grandes fonctionnalités des systèmes PLM, outils qui supportent cette démarche.

2 Besoin de gérer la configuration lors des phases de développement

Historiquement, l'avènement de la gestion de configuration s'inscrit comme le résultat des méthodes de gestion employées dans les industries de défense américaines durant les années cinquante, où les problèmes de production (qualité médiocre, mauvaise commandes de pièces, assemblages de composants impossibles, etc.) conduisaient inévitablement à des dépassements des coûts et des délais.

Jusqu'à cette période, il était possible pour un ingénieur (ou un groupe réduit d'ingénieurs) de comprendre et d'appréhender la conception ainsi que les processus d'obtention d'un système complexe. A la fin de cette décennie, la complexité des systèmes d'armement avait évolué à tel point que cette maîtrise devenait impossible. Une nouvelle méthode de gestion de la conception et de la configuration était donc requise, notamment pour supporter la collaboration entre diverses disciplines pouvant être amenées à intervenir dans le cycle de vie de ces systèmes.

Dans le même temps, l'industrie spatiale prenait son essor. La gestion des programmes et particulièrement des plannings devenait un facteur critique puisque des demandes de modifications étaient fréquemment émises afin de résoudre les incompatibilités entre

les composants livrés par les différents fournisseurs. Après un lancer réussi, il était fréquent qu'un client demande la même configuration de lanceur. Chose impossible puisque les prototypes avaient été sacrifiés et aucune trace des modifications apportées n'avait été conservée. Pas même les documents techniques ne reflétaient ces évolutions. Par conséquent, un second tir réussi voire la production du même lanceur ne pouvait être garantis [THO97].

En 1962, l'US Air Force met en place la première norme relative à la gestion de configuration : l'AFSCM 375-1 [AFS62] définissant les processus de gestion à mettre en oeuvre au cours du cycle de vie du produit garantissant ainsi un contrôle efficace des modifications.

Ce bref historique met en évidence certaines des raisons qui ont conduit à la mise en place de processus normés de gestion de configuration. A la lumière du contexte dans lequel nous évoluons, nous allons maintenant détailler les enjeux ainsi que les objectifs auxquels s'attache à répondre ce type de gestion.

2.1 Enjeux et objectifs liés à la gestion de configuration

Aujourd'hui, une des activités fondamentales d'un constructeur aéronautique est de coordonner un réseau d'acteurs en vue de l'intégration finale du produit. Mais aussi, de s'assurer de l'adéquation des performances et des propriétés du produit avec les attentes (implicites ou explicites) des compagnies aériennes clientes. Cette tâche est difficile, puisque ces acteurs n'ont pas les mêmes responsabilités vis à vis du produit et ne se voient pas attribuer les mêmes rôles puisqu'ils ne sont pas impliqués dans les mêmes activités. Ces différences dans les fonctions attribuées par le donneur d'ordres sous-entendent que les acteurs ne manipulent pas les mêmes informations et ne mettent pas en œuvre les mêmes compétences. Par conséquent, ce ne sont pas les mêmes registres de compétences et de connaissances qui sont mis à profit. Pourtant, malgré ces difficultés, les programmes en cours de développement doivent progresser selon les plannings établis. Parallèlement, afin d'asseoir un avantage compétitif, le constructeur doit pouvoir faire évoluer ses produits individuellement (introduction d'éléments innovants dans le développement d'un appareil donné) ainsi que son offre avec l'introduction de nouveaux modèles dans son catalogue de produits, ceci bien sûr en tenant compte des critères stratégiques et économiques qui gouvernent le marché mais aussi des exigences de certification qui le régulent. En effet, la conformité du produit avec les normes de sécurité internationales doit être validée par des tests à l'issue de la phase de développement. Mais la mise en place de méthodes visant à garantir cette conformité, au cours des phases de conception et de production doit également être validée. De plus, puisque la production se déroule en séries, il est important pour l'organisation de s'assurer de la reproductibilité d'un modèle.

Un constructeur doit donc mettre en place un ensemble de méthodes et de procédures d'ordre organisationnel et technique garantissant la réalisation de ces objectifs et assurant une réponse satisfaisante à ces enjeux. L'objectif de la gestion de configuration est donc de mettre en place et de définir ces méthodes ainsi que ces procédures (cf. Figure 12).

Dans le modèle représenté par la Figure 12, ainsi que dans la suite de ces travaux, nous considérons, que dans le contexte actuel, un constructeur aéronautique joue les rôles d'intégrateur et d'assembleur. Selon Principe dans [PRE03], il est possible de distinguer deux dimensions dans l'intégration des systèmes. Tout d'abord, l'intégration

synchrone, qui offre à l'organisation une vision stratégique à court terme, se réfère à ses capacités à concevoir le futur produit, le décomposer en modules, coordonner un réseau d'acteurs puis le recomposer à partir d'une architecture préalablement définie. L'intégration synchrone permet d'accéder à des ressources externes afin de :

- réduire les coûts de transaction,
- les risques dans le développement,
- les délais de mise sur le marché,
- les défauts de qualité
- les stocks.

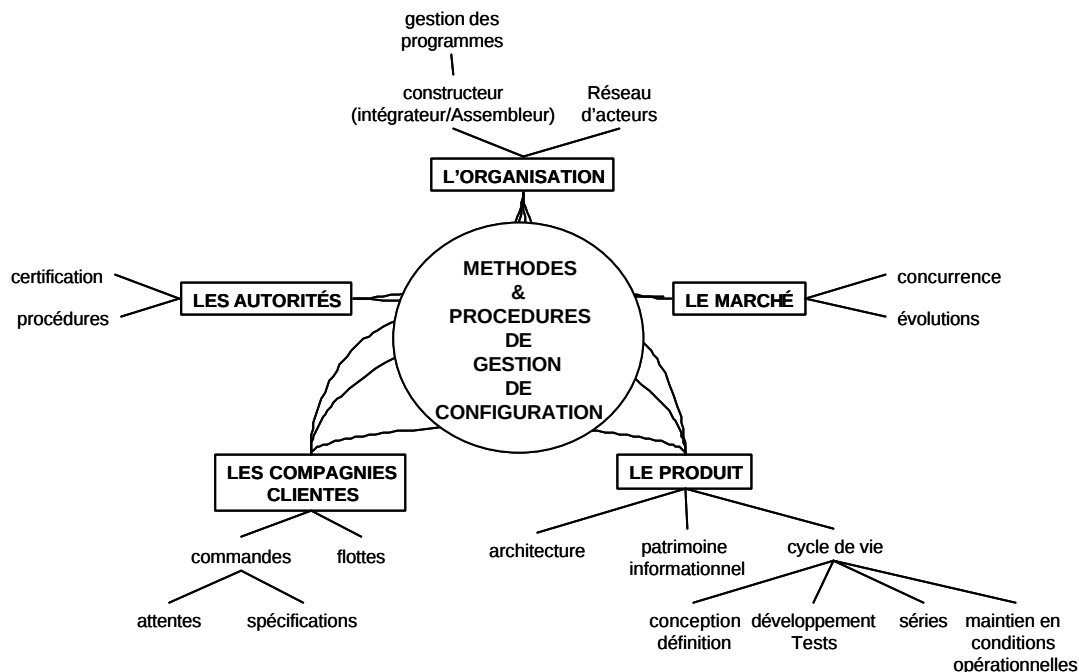


Figure 12 :Position de la gestion de configuration pour un constructeur aéronautique.

L'intégration diachronique offre, quant à elle, une vision à plus long-terme et est définie par l'aptitude du constructeur à créer de nouvelles architectures de produit afin de répondre à l'évolution des attentes et des spécifications des compagnies aériennes clientes. Ce second type d'intégration permet donc à l'organisation d'améliorer les produits introduits sur le marché afin d'asseoir ou développer son avantage compétitif sur le marché. De telles améliorations, souvent liées aux développements des technologies, jouent sur les leviers de l'innovation, de la flexibilité et de la création de connaissances. Ainsi, un constructeur aéronautique a un rôle d'intégrateur lorsqu'il décompose le produit en modules et qu'il attribue les activités de développement et de fabrication associées à chaque module aux différents acteurs du réseau. Ce rôle d'intégrateur implique le pilotage des différents processus en cours de réalisation ainsi que la coordination des acteurs de ce réseau. Il devient un assembleur lorsqu'il recompose le produit à partir des systèmes/composants développés et fournis par le réseau. L'architecture du produit constitue le «squelette» de l'organisation auquel il est possible de rattacher des composants, des processus et des acteurs.

Si l'un des objectifs de l'organisation est de répondre aux attentes et aux spécifications des compagnies clientes, le constructeur doit aussi s'assurer que les produits qu'il souhaite introduire sur le marché sont conformes aux exigences formulées par les autorités

de certification. La certification est l'acceptation, par les autorités, de la démonstration de conformité des appareils aux règlements. L'acceptation donne notamment lieu à l'établissement d'un certificat de navigabilité sans lequel un avion de transport civil ne peut voler¹⁵. Les organismes autorisés à fournir un certificat sont ; en France la Délégation Générale de l'Aviation Civile (DGAC), la Joint Aviation Authorities pour l'Europe et la Federal Aviation Authorities aux Etats-Unis. Ces organismes établissent les exigences minimales que le produit devra respecter. A titre d'exemple, le JAR¹⁶ 25 établit entre autres que « *la structure d'un avion doit être capable de supporter des charges extrêmes à tout moment de sa vie sans qu'il y ait rupture ou effondrement ayant des conséquences catastrophiques pour les passagers* ». Deux types de certifications peuvent être attribuées : la certification de type et la certification de navigabilité individuelle. La première est relative à l'avion standard, c'est à dire à la définition minimale du produit qui sera commune à l'ensemble des avions d'un certain type. Elle sera notamment attribuée si le constructeur démontre qu'il met en œuvre les moyens pour établir la conformité de la définition standard (Means of Compliance). Le second type de certification, la certification de navigabilité individuelle, est relatif aux exemplaires qui seront livrées aux clients. Elle passe donc par la certification des modifications qui auront été apportées sur chaque appareil.

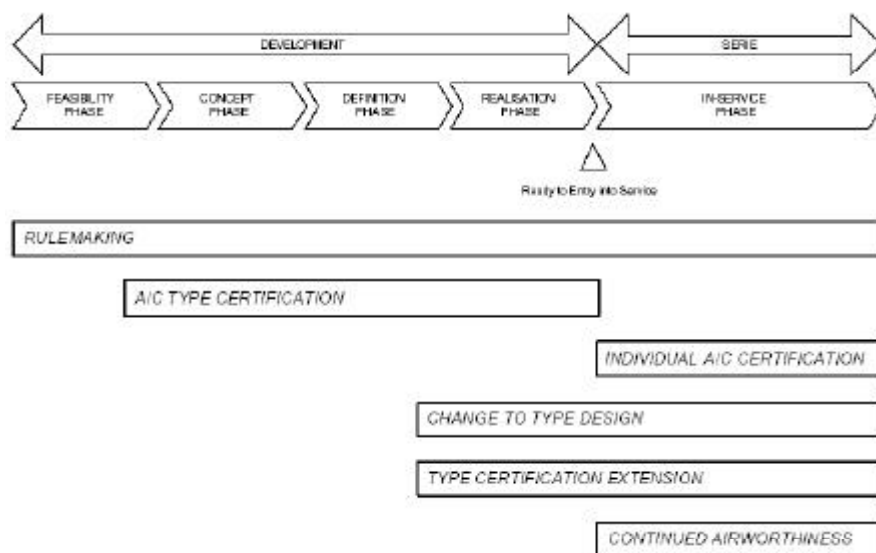


Figure 13 : Processus de certification [CAR01]

Pour un constructeur européen, ses responsabilités vis-à-vis des autorités sont donc de :

- 1 concevoir des produits conformes aux règlements techniques applicables : JAR 21 et JAR25,
- 2 vérifier et démontrer cette conformité,
- 3 définir les conditions d'utilisation et d'entretien

¹⁵ Cette disposition a pour origine la Convention de Chicago (ou Convention Organisation de l'Aviation Civile Internationale – OACI). Signée en 1944 et ratifiée par 200 états. Cette convention vise à faciliter le développement de l'aviation civile internationale, définir les standards de sécurité et de navigabilité et à vérifier l'application de la convention. Chacun des signataires s'engage à développer des exigences techniques et à vérifier la conformité des produits fabriqués. En contre-partie une autorisation réciproque de survol du territoire, pour les avions immatriculés dans les pays signataires, est allouée.

¹⁶ JAR (Joint Aviation Requirement) établi par la J.A.A.

- 4 fabriquer des appareils conformes à une définition approuvée,
- 5 analyser les incidents en service remettant en cause la navigabilité,
- 6 définir des actions correctives en accord avec les autorités et les compagnies clientes.

Ces impératifs de certification imposent au constructeur de connaître, quelle que soit la phase du cycle de vie de l'appareil, la configuration du produit, ses caractéristiques et ses performances ainsi que toutes les modifications apportées.

Vis-à-vis des compagnies clientes, un constructeur doit être en mesure de gérer les informations relatives aux produits à livrer (c'est à dire aux commandes) ainsi qu'aux produits livrés (c'est à dire à la flotte des compagnies). Le premier type d'informations est surtout lié à la gestion des spécifications et des attentes des compagnies liées aux standards choisis, aux options mais aussi aux aspects contractuels. Une configuration de l'avion tel que contractualisée doit être gérée. Cette configuration est élaborée en partenariat entre les métiers de la mercatique, du monde commercial et de l'ingénierie. Dans le second cas, une connaissance approfondie de la flotte d'une compagnie permettra au constructeur d'apporter des modifications correctives en cas d'incidents et introduire des évolutions visant à améliorer les performances des appareils ou celles du système de soutien des compagnies. Entre l'élaboration du contrat et la mise en service de l'appareil, d'autres configurations du produit doivent être disponibles afin de répondre aux besoins des métiers intervenant lors des phases de conception / définition, fabrication et développement.

Puisque ce marché est fortement compétitif, le constructeur doit être en mesure de positionner à tout moment son offre par rapport à celle de la concurrence. En effet, les compagnies ne confrontent que très peu d'offres et la différence se joue essentiellement sur les options ainsi que sur le prix de vente. Il est donc avantageux pour un constructeur de proposer un degré de personnalisation dans l'architecture d'un appareil permettant de répondre aux diverses attentes des clients tout en s'assurant de la rentabilité de ses programmes¹⁷. De plus, cette connaissance de l'offre de la concurrence ainsi qu'un lien étroit avec les compagnies lui permettront de pressentir les métamorphoses du marché et les futures demandes en termes d'architectures (standards et options).

Ces contraintes inhérentes à l'industrie aéronautique ainsi que les objectifs du constructeur mettent en évidence son besoin d'articuler ses processus autour de l'architecture du produit (ainsi que de son patrimoine informationnel). Il doit également maîtriser les évolutions de cette architecture dans le temps afin de répondre aux spécifications des compagnies clientes mais aussi pour fournir les justificatifs nécessaires aux autorités de certification.

2.2 Gestion de configuration : les points de vues « système » et « produit »

Dans les industries aéronautiques et spatiales, l'introduction de la gestion de configuration n'est pas motivée par les mêmes besoins selon qu'une organisation industrielle

¹⁷ Selon [BNA99] un programme peut être défini comme un « ensemble coordonné de tâches techniques, administratives et financières, destiné à concevoir, développer, réaliser et utiliser un produit, satisfaisant un besoin dans les meilleures conditions économiques, ainsi qu'à en assurer le soutien et à envisager les contraintes de retrait du service ».

adopte un point de vue « produit » ou « système ». Ainsi, il convient de s'intéresser également aux besoins des industries spatiales, aéronautiques militaires et civiles.

Par exemple, dans l'industrie des lanceurs spatiaux, le produit ne peut être décorrélé de la mission qu'il doit remplir. Ce n'est pas un produit physique qui est vendu mais le lancement d'un satellite d'un poids donné à une orbite précise. La conception du lanceur sous-entend également la conception des infrastructures de lancement et de contrôle. Dans ce cas précis, le produit est une partie d'un système et chacune de ses entités de même que l'ensemble doivent être gérés en configuration. Tâche d'autant plus difficile que chacune des composantes de ce système ne sont pas régies par le même cycle de vie. Le cycle de vie d'un lanceur s'étend de la conception d'une mission jusqu'à sa réalisation, c'est à dire à la mise en orbite du satellite alors que celui des infrastructures est beaucoup plus étendu et évolue au fil des campagnes de tir.

Si l'on examine maintenant de plus près l'industrie aéronautique militaire (avions et hélicoptères), les services que peut rendre le produit font partie d'une gamme définie par les armées clientes. Ainsi, un chasseur peut être amené à effectuer des missions offensives comme des missions de reconnaissances qui ne sous-entendent pas l'usage des mêmes équipements. De même qu'un appareil de transport peut être utilisé pour le transport de troupes ou pour le transport de matériel pouvant varier selon les objectifs et les théâtres d'opérations. Toutefois, quel que soit le type de service rendu, le produit s'intègre dans les systèmes opérationnels, de soutien et de commandement des forces armées. Par conséquent, la gestion de configuration de tels systèmes doit comprendre, dès la conception, la modularité des services à rendre ainsi que les interfaces avec les systèmes des forces armées existants. Une des phases du cycle de vie qu'il est également important de prendre en compte avec ce type de produit est la phase d'acquisition. Le constructeur devra intégrer au produit des systèmes d'armement pour lesquels il n'est responsable ni de la conception ni du développement et dont il devra suivre les évolutions pour que l'intégration soit possible.

Pour les avions et hélicoptères civils de transport de passagers, le produit peut être considéré indépendamment du système de transport aérien (indépendamment des infrastructures aéroportuaires comme pour le développement de l'A380). Les interactions entre le produit et ce système n'entrent que dans les spécifications au travers du respect des normes et des règlements établis par les autorités. Le produit est principalement défini en fonction d'une distance maximale à parcourir et du nombre de passagers à transporter. Par conséquent, seul le produit aux divers stades de son cycle de vie doit être géré en configuration. Ceci implique, bien entendu, que le constructeur soit également en mesure de gérer en configuration les éléments de son système de production et de soutien puisque ceux-ci sont liés à l'appareil en cours de conception. Toutefois nous ne nous intéresserons pas à la gestion de configuration de ces systèmes dans le cadre de nos travaux.

Il est finalement possible de mettre en évidence les facteurs influant sur les méthodes et les pratiques de gestion de configuration comme le montre la Figure 14.

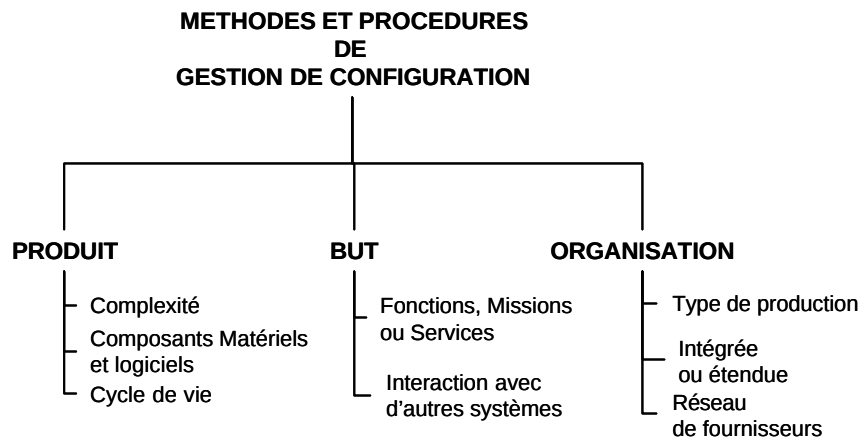


Figure 14 : Facteurs influant sur les pratiques et procédures de gestion de configuration

Ces facteurs peuvent être agrégés selon trois catégories, ceux afférents au produit et à son but ainsi que ceux relatifs à l'organisation. En premier doivent être pris en compte la complexité du produit et de son cycle de vie ainsi que la variété des systèmes qui composent le produit. Si la plupart des produits aéronautiques reposent sur une structure physique et matérielle, il serait dangereux d'ignorer les composants logiciels dont la proportion est en constante augmentation. Les composants logiciels ne peuvent être gérés avec les mêmes méthodes qu'un composant physique. De plus, si l'on prend l'exemple des satellites, la maintenance physique n'existe pas tandis que les programmes supportés par les logiciels embarqués peuvent être amenés à évoluer. Ensuite, le but du produit et son interaction avec d'autres systèmes lui permettant de réaliser sa fonction sont également des facteurs déterminants dans l'établissement de procédures de gestion de configuration mais surtout dans la détermination de leur périmètre d'utilisation. Ce périmètre tient compte uniquement des systèmes rentrant dans le champ d'application des méthodes de gestion. Enfin, les facteurs liés à l'organisation permettent, quant à eux, de cibler les acteurs concernés selon la configuration de l'organisation. Dans la définition des acteurs, les problématiques d'acquisition deviennent particulièrement importantes.

Toutefois, les pratiques particulières mises en œuvre dans certaines industries aéronautiques sont dérivées de modèles normés et standardisés plus génériques. Nous allons dans la suite apporter des précisions sur ce plan.

3 La gestion de configuration

La définition la plus simple de la gestion de configuration est proposée par la norme ANSI/EIA-649 [EIA98] qui la définit comme « un processus visant à établir et maintenir la cohérence du produit avec ses spécifications et ses informations de configuration à chaque phase de son cycle de vie ». Le but de ce chapitre est donc d'étudier, à partir des normes les plus importantes du domaine, les informations que ce processus (en réalité un ensemble de procédures et de méthodes) permet de gérer (aspects statiques) ainsi que les mécanismes qui lui sont liés (aspects dynamiques). Par « plus importantes » nous entendons ici nous focaliser sur les normes sur lesquelles se sont appuyées ou s'appuient toujours les activités de développement des organisations industrielles dans l'industrie aéronautique. Par conséquent, nous prenons en compte les normes suivantes :

- 1 **ISO 10007**[ISO95]¹⁸. Cette norme vise à établir les objectifs principaux de la gestion de configuration dans l'esprit des normes de la famille ISO 9000. Toutefois, cette norme apporte plus de préconisations qu'elle ne fournit de méthodes et a plutôt pour buts d'établir une compréhension commune du sujet et de promouvoir la mise en place de cette discipline dans l'industrie. La norme ISO 10007 s'adresse à l'ensemble des industries et bien qu'elle tente de couvrir à la fois les besoins matériels et logiciels, on ne peut que regretter que ce dernier aspect ne reste que très peu abordé. Quoiqu'il en soit, la norme ISO 10007 fournit une base solide pour des normes plus spécialisées apparues ultérieurement.
- 2 **RG AERO 00023** [BNA97]¹⁹. Cette norme est dérivée de la norme ISO 10007 pour l'industrie aéronautique. Elle fait ainsi apparaître deux niveaux de procédures. Le premier considère la gestion de configuration du produit dans le cadre du programme avion alors que le second considère les procédures au niveau de l'organisation. Bien que spécialisée, cette norme souffre des mêmes limitations que l'ISO 10007.
- 3 **ANSI/EIA-649** [EIA98]²⁰. La norme ANSI/EIA-649 s'adresse plus particulièrement aux industries électrique, électronique et informatique. Elle a toutefois le mérite de couvrir des sujets problématiques pour d'autres industries. De plus, celle-ci comporte une section dédiée à la gestion de configuration des données électroniques. Cette caractéristique est particulièrement importante dans des contextes industriels où les échanges d'informations et de modèles deviennent prépondérants.
- 4 **MIL-HDBK-61**[DOD 97]²¹ : La norme MIL-HDBK-61 constitue aujourd'hui le modèle de gestion le plus abouti dans le domaine. Cette dernière va au-delà des préconisations habituelles et propose des règles et des méthodes pour la gestion de configuration. Même si elle reste dédiée aux industries militaires, elle intègre une dimension cruciale pour une entreprise étendue qui est celle des responsabilités en matière de gestion de configuration dans la chaîne logistique.

Les quatre normes décrites précédemment s'articulent toutes autour de six grandes composantes comme le montre la Figure 15.

¹⁸ ISO : International Standards Organization (<http://www.iso.ch/iso/en/ISOOnline.frontpage>).

¹⁹ BNAE: Bureau National de l'Aéronautique et de l'Espace

²⁰ ANSI.EIA : American National Standards Institute (<http://www.ansi.org>)/Electronic Industries Alliance (<http://www.eia.org>).

²¹ DoD : US Department of Defense (<http://www.defenselink.mil>) . MIL-HDBK : Military Handbook.

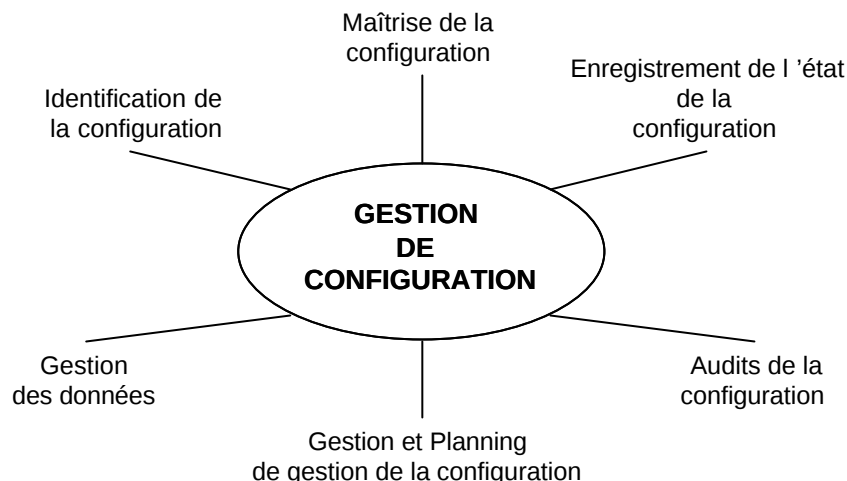


Figure 15 : Composantes de la gestion de configuration

Notre objectif est maintenant de détailler chacune de ces composantes tout en essayant d'y associer les problématiques scientifiques majoritairement issues du monde de la conception. Ceci en gardant à l'esprit les contraintes et les enjeux relevant de l'industrie aéronautique civile.

3.1 Gestion et Planning de l'activité de gestion de la configuration

La démarche qui vise à gérer la configuration d'un produit tout au long de son cycle de vie est stratégique pour toute organisation industrielle. Elle doit donc être pilotée et gérée à un niveau stratégique de l'organisation souvent lié au service qualité. Le but de ce pilotage est :

- de s'assurer que les procédures de gestion de configuration et les activités qui en découlent sont effectivement mises en œuvre;
- d'établir les responsabilités organisationnelles de chacun par rapport aux différentes activités de gestion de configuration;
- d'attribuer les ressources nécessaires pour effectuer et réaliser ces différentes activités;
- d'établir une base en vue d'une amélioration continue des processus;
- de faire converger les efforts vers une plus grande maturité des processus.

L'essentiel de ces objectifs et de ces procédures doit être décrit dans un document appelé « Plan de Gestion de la configuration ». Il décrit la manière dont la gestion de configuration doit être accomplie et comment la cohérence entre la définition du produit, sa configuration et les enregistrements est établie et maintenue à toute phase de son cycle de vie. La norme préconise un découpage générique de ce plan selon les différentes activités de gestion de configuration. Des procédures doivent ensuite être établies afin d'implanter opérationnellement les directives de ce plan. Dans le contexte d'une entreprise étendue, ce type de plan a le mérite de préciser les rôles ainsi que les responsabilités de chacune des entités par rapport à l'activité de gestion de configuration.

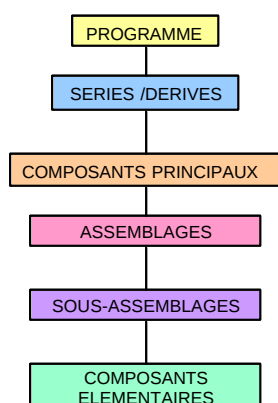
3.2 Identification de la configuration

Selon la norme ISO 10007 [ISO95], l'identification de la configuration regroupe « les activités destinées à déterminer les constituants du produit, à choisir les articles de configuration, à fixer dans des documents les caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un article de configuration, y compris les interfaces et les évolutions ultérieures et à allouer des caractères ou des numéros d'identification aux articles de configuration et à leurs documents ». Par conséquent, il est possible de considérer l'identification de la configuration comme la définition de l'architecture du produit en fonction des exigences de son cycle de vie et des besoins liés à ses futures évolutions.

3.2.1 Structuration et définition de l'architecture produit

La structure du produit est générique. C'est à dire qu'elle représente à la fois l'ensemble des instances du produit ainsi que chacune d'entre-elles si les filtres adéquats sont appliqués. Généralement, ces filtres sont des effectivités qui permettent d'obtenir la configuration d'une instance ou d'un groupe d'instances par rapport à des rangs exprimés en numéro de série²², en standards ou en versions. Cette modélisation du produit peut être découpée en plusieurs niveaux [MOR99] [HAN01]. Dans un contexte aéronautique, il est possible de distinguer six niveaux principaux dans la structure produit (Cf. Figure 16).

NIVEAUX DE LA STRUCTURE PRODUIT



EXEMPLE DE STRUCTURE

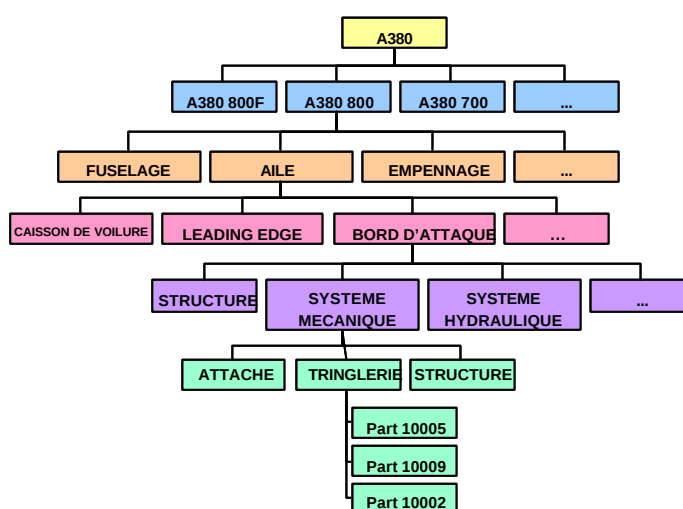


Figure 16 : Les niveaux de la structure produit dans un contexte aéronautique

Le premier niveau spécifie à quel programme est relative cette structure. Le second niveau spécifie quant à lui les différentes variantes qui existent au sein du programme. On rejoint le concept de famille de produits pouvant partager les mêmes composants principaux au troisième niveau. C'est à ce niveau que la responsabilité d'une entité de l'organisation est associée à un des éléments principaux en vue de son développement et de sa fabrication. Les trois premiers niveaux permettent donc de définir l'offre du constructeur, de définir les responsabilités et d'introduire les plates-formes afin d'introduire plus de commonalité au sein d'un programme. Les autres niveaux permettent de décomposer ces éléments principaux en assemblages puis en sous-

²² Dans l'industrie aéronautique un numéro de série correspond au Manufacturer Serial Number (MSN).

assemblages et enfin en composants élémentaires. Si cette structure est appréhendée depuis le haut vers le bas, on obtient une décomposition du produit. A l'inverse, si elle est lue depuis le bas vers le haut on obtient une structure d'intégration du produit. C'est pourquoi les liens qui unissent les composants des différents niveaux sont des liens de type « utilise / est utilisé par » et que chaque nœud de la structure représente une activité d'assemblage.

Si cette structure est la structure maîtresse du constructeur aéronautique, elle ne permet pas à l'ensemble des métiers impliqués dans le cycle de vie de les manipuler. C'est pourquoi plusieurs structures du produit cohabitent dans l'organisation. On distinguera une structure du produit tel qu'il a été spécifié et qui correspond à une description fonctionnelle du produit (Vue produit « tel que spécifié » ou « As required »). C'est ensuite une structure du produit destinée à la conception qui est mise en place (Vue produit « tel que conçu » ou « As designed »). Elle fournit une solution avec sa décomposition en composants physiques ou logiciels correspondant aux fonctions décrites préalablement. Toutefois, cette définition doit répondre aux contraintes de production. Une troisième structure est donc mise en place pour la réalisation du produit (Vue produit « tel que planifié » ou « As planned »). Par exemple, pour un avion si les tuyauteries d'alimentation sont conçues comme une seule pièce, elles ne peuvent pas être réalisées et installées d'un seul tenant. Par conséquent, un composant défini peut être associé à plusieurs composants dans sa structure de fabrication. Au delà de cette simple décomposition, ce ne sont pas les mêmes informations qui seront rattachées aux items de la structure. Néanmoins, la cohérence entre ces différentes structures entre dans les objectifs de la gestion de configuration. Au final, les architectures du produit permettent la mise en place du concept de « multi-vues » sur le produit qui permet de le gérer en configuration tout au long de son cycle de vie [TIC95].

L'identification de la configuration ne comprend pas simplement la définition des différentes structures du produit au cours de son cycle de vie mais comprend également la gestion de la documentation de chacun des items de cette structure. En effet si, dans la structure, il est possible d'associer des attributs à chacun des items, ceux-ci ne recouvrent pas toutes les informations générées au cours de son cycle de vie. Par conséquent, on rattache à chaque item de la structure les modèles et la documentation technique les décrivant. Pour que l'association des items et de leurs documentations soit efficace, un système de codification servant à identifier à la fois les items et les documents doit être mis en place. Cette codification doit permettre la gestion :

- des relations hiérarchisées entre les articles de configuration au sein de l'arborescence du produit,
- des relations hiérarchisées des sous-ensembles et constituants dans chaque article de configuration,
- des relations entre les documents et les évolutions.

Aujourd'hui, différentes méthodes de codification existent [AGA02] et leurs performances dépendent très fortement du contexte d'utilisation.

3.2.2 Les articles de configuration : Des points d'invariance dans la structure du produit

L'ensemble des items d'une structure sur lesquels ont pris les mécanismes de gestion de configuration sont appelés des articles de configuration. Il convient donc de les choisir avec précaution selon leur criticité pour la gestion du cycle de vie de produit et pour le bon fonctionnement de l'organisation en entreprise étendue. A cet effet, la

norme RG AERO 00023 [BNA97] préconise de sélectionner les articles de configuration selon les caractéristiques suivantes :

- l'homogénéité technique et de gestion (unité de maîtrise d'œuvre),
- les risques associés (y compris coûts, délais, technologies, etc.),
- l'expérience acquise sur des produits de caractéristiques analogues,
- d'éventuelles contraintes extérieures au programme (item utilisé sur d'autres programmes, item sur étagère, item fourni par le client, etc.)
- les contraintes logistiques.

Dans un contexte aéronautique, où le produit comprend un nombre élevé de composants et où les structures du produit peuvent atteindre plusieurs dizaines de niveaux, les articles de configuration revêtent une signification particulière. En effet, il serait dangereux que la modification d'un composant élémentaire conduise à la modification d'un composant majeur. Les articles de configuration constituent donc des barrières de confinement des modifications dans la structure. De plus, quel que soit l'appareil développé et produit, il faut s'assurer qu'il puisse répondre aux exigences tout en autorisant une part de variabilité due aux options. Les articles de configuration seront donc utilisés comme des points d'invariance dans la structure du produit. Les solutions techniques représenteront les parties variables du produit selon le choix des options et les effectivités demandées (Cf. Figure 17). Un article de configuration indique que, quel que soit l'appareil développé, au moins une solution technique devra y être associée. Cependant, s'il existe plusieurs solutions techniques pour un même article de configuration (on parlera alors d'alternatives de solutions) une et uniquement une sera montée sur le produit. Une solution technique pourra à son tour être associée à un article de configuration.

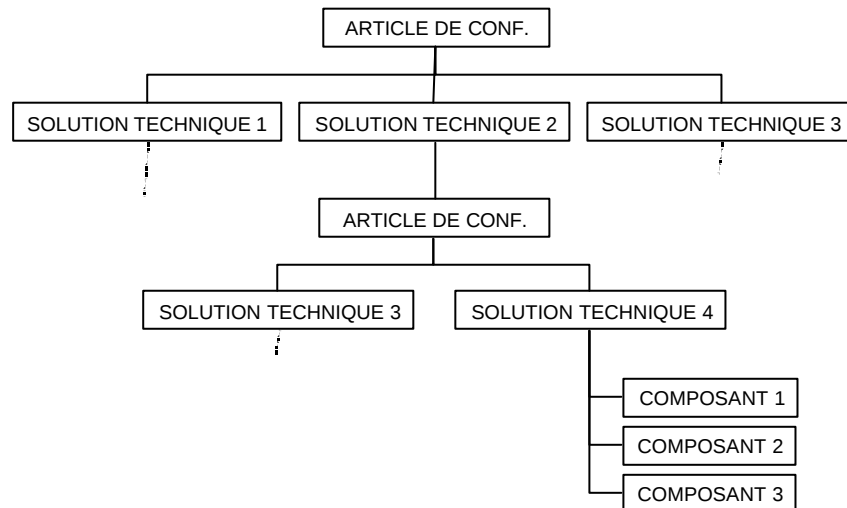


Figure 17 : Doublons Articles de Configuration- Solutions Techniques

Ainsi, la modification d'un composant élémentaire n'induirait automatiquement que la remise en cause de la solution dont il dépend.

3.2.3 Etablissement des configurations de référence ou remarquables

Une configuration de référence se compose de tous les documents approuvés représentant la définition du produit à une étape de son cycle de vie. Dans notre contexte, les configurations de référence sont dénommées « baselines » et sont associées à des jalons du cycle de vie du produit (Cf. Chapitre 1). Le but de cette configuration est de

fournir une référence servant de point de départ pour des activités ultérieures. Il existe trois configurations de référence remarquables :

- *la configuration de référence fonctionnelle* qui est la référence convenue pour lancer la conception préliminaire. Elle est essentiellement composée de la STB (Spécification Technique de Besoin), du Cahier des Charges Fonctionnel ainsi que d'éléments de description des concepts de solution proposés.
- *la configuration de référence de développement* qui est la référence pour lancer la conception détaillée. Elle est composée des STB, des concepts de solutions retenus et éventuellement de la décomposition du produit en fonction des constituants connus.
- *la configuration de référence de production* est la référence pour lancer l'industrialisation et la production. Cette configuration est acquise lorsque les acteurs concernés constatent un avancement de la conception détaillée tel que la définition soit suffisamment justifiée pour servir de référence pour l'industrialisation et la production et que les risques résiduels identifiés sont ramenés à un niveau compatible avec les engagements à tenir. Elle est constituée de la configuration de référence de développement complétée de tout ou partie des éléments du dossier de définition requis par chaque intervenant.

3.3 Maîtrise de la configuration : gestion des modifications et des évolutions

Maîtriser la configuration consiste à gérer ses évolutions ainsi que ses modifications à toutes phases de son cycle de vie. Dans cette perspective, la distinction entre les concepts d'évolution, de modification et d'itération s'avère particulièrement importante car ils ne font pas appels aux mêmes mécanismes de gestion.

Les itérations, indissociables des processus de développement en ingénierie concourante, ne sont pas obligatoirement traitées dans le cadre d'un processus formalisé et ne sont relatives qu'à des informations non figées au cours d'une revue de projet. Elles sont souvent la remise en cause d'une information manipulée dans une activité aval suite à l'évolution d'une information générée au cours d'une activité plus en amont dans un processus. Une itération impose donc de réaliser une nouvelle fois une activité déjà réalisée. Smith et al. dans [SMI97] distinguent deux formes d'itérations, les prévisibles et les inattendues. Puisque deux activités dépendantes d'un même flux de données peuvent être déclenchées au même moment, l'avancement d'une activité peut conduire à la remise en cause des données issues de l'autre activité au travers d'une itération. Si ces itérations sont prévisibles, leur nature reste inattendue. Une itération imprévisible résulte quant à elle d'une erreur générée par une activité amont conduisant à une remise en cause des activités qui en dépendent en aval du processus.

Une modification est considérée comme « une altération de la configuration approuvée d'un item » [USM88]. Un item peut être un composant physique ou virtuel voir un document de la structure du produit. Les configurations approuvées sont établies lors des revues de configuration menées à différents jalons du projet. Par conséquent, si dans sa nature la modification peut être comparée à une itération, elle sera gérée au travers d'un processus formalisé.

L'évolution est un terme vague dont la définition peut varier selon le point de vue sur la remise en cause. En effet, si l'on s'intéresse à l'innovation dans les processus de développement, l'évolution peut être considérée comme la progression de l'enrichissement du produit dans le temps. Un observateur focalisé sur les processus de l'organisation,

considérera une évolution comme le passage du produit (ou d'une de ses composantes) d'un indice de versionnement à un autre. Dans nos travaux, l'évolution et la modification revêtent le même sens.

3.3.1 Les Modifications en phase de développement

Avant de détailler les processus de gestion des modifications préconisés par les normes, il est important de mieux comprendre ce phénomène dans sa globalité. Dans un premier temps nous étudierons les causes possibles conduisant à l'élaboration d'une demande de modification, ses conséquences potentielles et son comportement probable. Quel que soit le produit étudié, c'est au cours de sa phase de développement que le traitement d'une modification est le moins problématique.

3.3.1.1 Coûts et opportunités de traitement des modifications

Si l'on considère tout d'abord le volume de modifications traité au cours du cycle de vie du produit, il apparaît que celui-ci augmente progressivement jusqu'à atteindre son apogée en phase de définition (Cf. Figure 18).

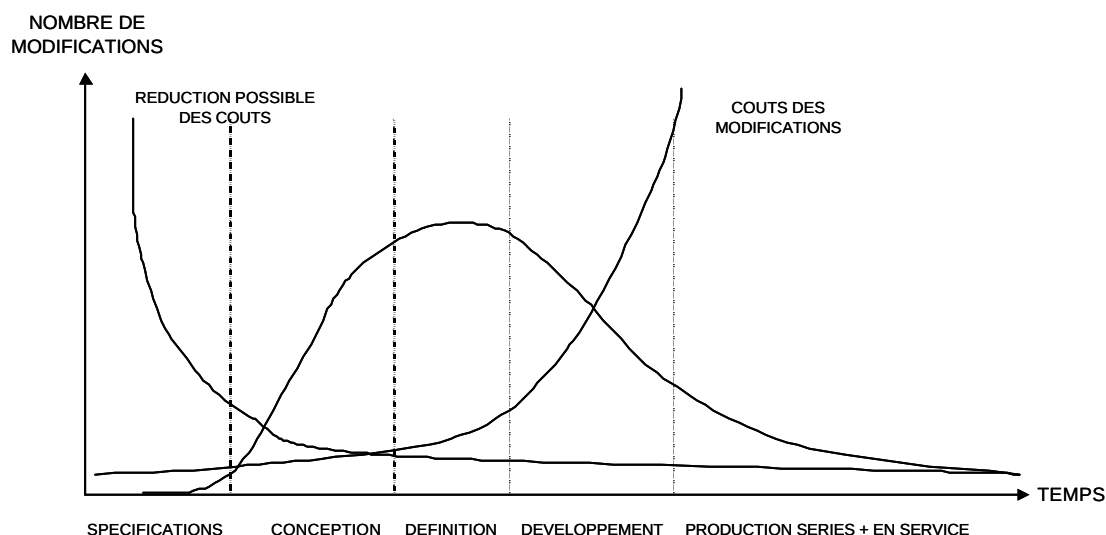


Figure 18 : Volumes et coûts des modifications dans le cycle de vie du produit

Ce volume diminue ensuite graduellement au cours de la phase de développement du premier produit qui est mené à maturation au travers de nombreux tests. Lorsque la phase de production série est lancée et que, par conséquent, des appareils sont déjà en service, le nombre de modifications tend alors à rester constant pour ensuite augmenter légèrement car le produit est en fin de vie. Généralement, le cycle de vie d'un programme atteint une cinquantaine d'années. Force est de constater que la réduction possible des coûts du programme diminue avec l'avancement du programme et que, par ailleurs, le coût de traitement d'une modification augmente progressivement avec le déroulement du cycle de vie du produit. C'est pourquoi il est important d'identifier, au plus tôt, les points techniques pouvant faire l'objet d'une future demande de modification. Ceci implique également que les demandes soient traitées le plus rapidement possible et au plus tôt dans le cycle de vie du produit.

3.3.1.2 Causes et conséquences des modifications

L'origine d'une demande de modification peut être difficile à déterminer puisque ses causes peuvent être multiples. Il est tout de même possible de classer les causes pri-

maires des modifications. Les « causes primaires » sont les causes qui ne sont pas elles-mêmes des modifications. En effet, dans ce cas, nous parlerons de propagations d'une modification.

Des travaux ont déjà été réalisés sur les causes des modifications en se focalisant sur les programmes militaires [HSU96]. Il est toutefois possible de compléter la catégorisation proposée en fonction de diverses enquêtes menées chez un avionneur européen (AIRBUS).

- *Evolutions des besoins et modifications des spécifications* : La stabilité du besoin et des attentes des clients est un rêve pour toute organisation industrielle. En réalité, ces besoins évoluent avec l'identification de nouvelles fonctionnalités dépendant de l'utilisation future du produit, des offres proposées par les concurrents, des fournisseurs que la compagnie cliente souhaite privilégier ou le désir d'introduire de nouvelles technologies, etc. [WEN97]. Les besoins exprimés par un client peuvent également évoluer en fonction de contraintes telles que : le contexte dans lequel le produit sera exploité, la cohérence de sa flotte, etc. Des spécifications peuvent également être revues si des problèmes ou des incompréhensions sont survenus lors de leur capture.
- *Interactions entre des programmes* : Les programmes en cours (c'est à dire ceux qui ne sont pas déclarés obsolètes et donc toujours en service) sont toujours étroitement liés. Ainsi, une modification instruite au titre d'un programme particulier peut conduire à la mise à jour d'un programme plus avancé ou à l'établissement d'une solution standard pour de futurs projets. A un stade avancé du déroulement du projet, afin de contrôler l'apparition de modifications dues à ces interactions, un effort important doit être mis en œuvre afin de définir les frontières entre les programmes. De plus, sur un marché où la personnalisation (ou customisation) des produits devient un argument compétitif, la conception de produits modulaires offre l'opportunité de limiter le nombre de modifications [STA98]. La création de familles de produits et la conception de plates-formes communes à plusieurs références présentent des perspectives intéressantes pour la gestion des modifications. En effet, pour une famille de produit, il est bien plus compétitif d'étudier une modification et d'implanter une solution au niveau d'une plate-forme plutôt que de conduire la même analyse pour toutes les références de la famille. Par conséquent, si des organes ou des fonctions similaires existent pour toutes les références, ceux-ci devraient être rattachés à la plate-forme.
- *Corrections des insuffisances et des erreurs* : Au cours des phases de développement et d'assemblage du produit, ne pas s'attendre à des modifications dues à des erreurs commises lors des phases amonts semble illusoire même si des méthodes de qualité et de travail collaboratif ont été introduites. Au cours du cycle de vie du produit des modifications sont donc introduites afin de pouvoir corriger les erreurs produites par des tâches en amont.

- *Evolutions des technologies* : Plusieurs raisons sont la cause de l'introduction de modifications liées aux évolutions technologiques. Tout d'abord, les compagnies clientes s'offrent la possibilité d'incorporer dans leurs produits, les technologies les plus récentes pour différentes raisons (maîtrises des coûts, meilleures performances, etc...). Parfois, ces compagnies voire le constructeur n'ont pas d'autres choix lorsque les technologies utilisées deviennent obsolètes et donc plus difficiles à maintenir. Finalement, pour des raisons financières, les compagnies peuvent modifier leurs spécifications originales afin d'accepter des performances plus faibles ou plus réalistes pour lesquelles une technologie différente s'avère plus adaptée.
- *Evolutions de la législation* : Pour des raisons de sécurité, les autorités de certifications sont des acteurs incontournables dans l'industrie aéronautique (Cf. 2.1 de ce même chapitre). En effet, celles-ci déterminent les spécifications que devra remplir le produit afin d'être certifié pour être opérationnel. Si ces spécifications évoluent, alors des modifications peuvent être envisagées afin que les produits en cours de développement répondent à ces nouveaux objectifs.
- *Evolutions des plannings et des objectifs d'un programme* : En fonction des attentes des compagnies clientes ou de retards internes, l'avancement d'un programme peut être remis en cause afin de répondre aux objectifs contractuellement acceptés. Si ces objectifs ne peuvent pas être atteints dans les délais impartis, alors le constructeur peut être amené à modifier certains systèmes du produit.

Cette caractérisation souligne le nombre important de causes et d'acteurs pouvant être à l'origine d'une demande de modification. Toute la difficulté réside dans le contrôle des nombreux facteurs pouvant être à l'origine de modifications et susceptibles d'avoir des effets négatifs sur le produit mais aussi sur l'entreprise. Cette caractéristique est à l'origine de ce travail de thèse.

De même que pour les causes, il est à priori difficile d'identifier les conséquences possibles de l'application d'une demande de modification. Dans la plupart des cas, ces conséquences sont plutôt considérées comme des problèmes plutôt que comme des opportunités conduisant à une évolution du produit [RIN98]. En effet, à court terme, les modifications introduisent des surcoûts dans les budgets et des retards dans les programmes. Mais les modifications peuvent également améliorer les performances du produit, faire baisser des coûts à d'autres phases du cycle de vie du produit (assemblage, exploitation, maintenance, etc.) et conforter un avantage compétitif. C'est pourquoi, dès son instruction, il est important de prendre en compte l'ensemble des conséquences de l'application d'une modification. Même s'il reste parfois difficile de quantifier ces conséquences, il est possible de les qualifier.

- *Conséquences budgétaires à court terme* : Quelle que soit l'origine de la demande de modification, celle-ci aura un coût incompressible lié à son traitement. Si dans la plupart des cas les modifications augmentent les coûts du programme, il arrive parfois qu'elles les réduisent. L'évaluation de ces coûts permettra de décider si une demande de modification doit être traitée ou non.

- *Impacts sur le déroulement du programme* : Dans l'industrie aéronautique, les jalons principaux d'un programme ne peuvent que difficilement être déplacés sans conséquences majeures. Par conséquent, les modifications ne peuvent pas avoir d'incidence sur eux mais certaines activités peuvent prendre du retard. Les activités impactées doivent donc être repositionnées par rapport aux jalons auxquelles elles sont liées.
- *Influences sur les performances du produit par rapport aux objectifs fixés* : Quant à l'incidence d'une modification sur les performances du produit, on identifie trois types d'influences. Par nature, le traitement d'une demande de modification conduit généralement à l'accroissement des performances du produit. Toutefois, certaines modifications affectant directement les systèmes manufacturiers ou de supports peuvent dégrader les performances du produit. Dans le dernier cas, la modification n'a aucune incidence sur les performances du produit si elle impacte uniquement le système documentaire (mise à jour de plans, de manuels de maintenance, etc.).
- *Impacts des activités confiées aux fournisseurs, partenaires et sous traitants* : Dans l'entreprise étendue, les modifications n'affectent pas seulement le donneur d'ordre mais aussi l'ensemble des acteurs de l'organisation : partenaires, sous-traitants et parfois les fournisseurs. Il est donc important de prendre en compte ces incidences lorsque le traitement d'une demande de modification est initié car une modification mineure du donneur d'ordre peut avoir des conséquences désastreuses dans une organisation partenaire mais surtout sur le système dont cette entité a la responsabilité.
- *Conséquences pour les autres programmes* : Il peut arriver qu'une modification relative à un programme donné puisse impacter d'autres programmes. Cette possibilité doit être prise en compte lors des premières investigations des demandes.
- *Apparitions d'autres modifications* : Les modifications relatives à une fonction, un élément ou un sous-système du produit peuvent se propager à d'autres items aux travers de leurs interfaces. C'est pourquoi des études doivent être conduites sur les propagations potentielles des modifications. Ce phénomène « d'avalanche » peut être partiellement contrôlé si la structure produit est correctement définie.
- *Altérations du cycle de vie du produit* : La gravité des conséquences d'une modification dépend principalement de la phase du cycle de vie du produit pendant laquelle la demande de modification est initiée et de la phase pendant laquelle une solution est introduite. Généralement, le nombre de modifications relatif à un système augmente jusqu'à l'entrée en service de l'appareil. Sachant que le coût de traitement de la modification augmente en fonction de l'avancement du programme. Il est recommandé d'en traiter la plus grande part au cours de phase de conception du produit.

- *Détériorations de l'image de l'entreprise* : Une modification, lorsqu'elle est mal traitée, peut détériorer l'image de l'entreprise car les compagnies clientes peuvent perdre confiance dans la capacité de l'entreprise à répondre à leurs demandes ou dans le produit lorsque celui-ci offre un niveau de performance bien en dessous de leurs attentes. Cette détérioration est d'autant plus critique pour l'entreprise qu'elle prospecte sur de nouveaux marchés.

Comme pour les causes, il est plutôt rare qu'une modification ne conduise qu'à une simple et unique conséquence. Dans l'entreprise étendue, lorsque des produits complexes sont développés, le principal défi est d'établir clairement les causes motivant une demande de modification et de tenter de prévoir le plus finement possible les conséquences de cette demande.

2.1.1.1 Comportement des modifications

Un phénomène important à prendre en compte lors de l'analyse des conséquences est la propagation d'une modification du composant impacté initialement vers d'autres composants au travers des liens qui les unissent. Il est alors possible de caractériser les propagations en fonction du nombre de composants impliqués et de son déroulement dans le temps (Cf. Figure 19).

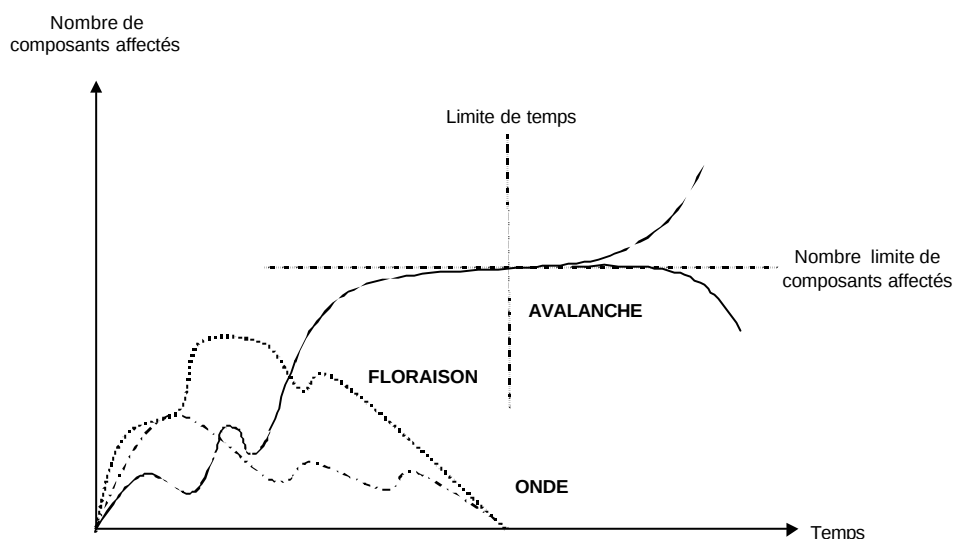


Figure 19 : Différents types de propagation des modifications

Ainsi, nous parlerons :

- d'une *floraison de modifications* quand le nombre de composants impliqués dans la propagation augmente puis diminue brusquement tout en restant sous contrôle,
- d'une *onde de modifications* lorsque le nombre de composants impactés évolue puis diminue progressivement toujours sous contrôle,
- d'une *avalanche de modifications* où une modification initiale remet en cause des composants et qui elles-mêmes sont à l'origine d'autres modifications. Dans ce cas, il devient très difficile de maîtriser la propagation. La faculté de propagation d'une modification réside essentiellement dans la propriété des composants et de leurs liens à l'absorber, la porter ou la multiplier.

3.3.2 Un processus générique de traitement des modifications

Le processus de traitement d'une modification est, en de nombreux points, comparable avec un processus de résolution de problème [MAL96]. C'est l'apparition d'un fait technique formalisé par une demande de modification qui déclenche un processus de traitement qui aboutira alors à l'implantation d'une solution technique.

Les normes, prises en compte dans ces travaux, établissent des préconisations pour la définition de ce processus. Ces préconisations vont des règles élémentaires garantissant une gestion rigoureuse des demandes de modification [ISO95] à la définition d'un processus complet de traitement [EIA98]. A partir de ces préconisations et des investigations menées chez un avionneur européen, il nous est possible de définir un processus générique de traitement des demandes de modification (Cf. Figure 20). Le processus est découpé en trois grandes étapes pouvant se dérouler de manière séquentielle ou concourante, avec des jalons décisionnels entre chacune d'entre-elles ainsi que des bouclages. Ces aspects ne sont pas représentés par la Figure 20, ils existent néanmoins.

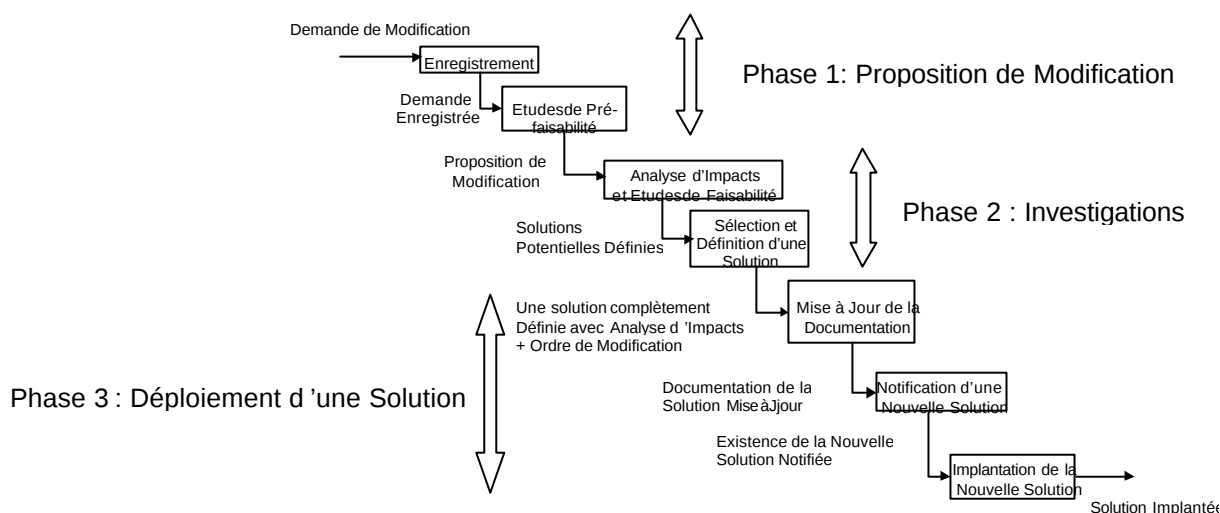


Figure 20 : Processus générique de traitement des modifications

3.3.2.1 Proposition de modification

La première étape est la phase de proposition d'une modification. Stade auquel la demande de modification est formalisée et documentée selon les procédures et les modèles de l'organisation. C'est au cours de cette étape que l'on détermine l'origine de la demande, le but de cette demande, les items pouvant être impactés ainsi que son applicabilité. L'applicabilité permet de déterminer les instances du produit auxquelles la modification est relative. Dans notre contexte, elle peut être exprimée en termes d'instances (par exemple MSN des rangs 0001 à 0023), de standards (Standards A et Standard B) ou encore en versions (Versions AIRFRANCE des rangs 0008 à 0011). Cette détermination repose sur les plannings des commandes, sur les contraintes de développement et de fabrication ainsi que sur la criticité de la demande. Elle tient également compte du phénomène de « retrofit » qui est l'application éventuelle d'une modification sur des appareils déjà livrés. Une fois la demande formalisée, il est nécessaire

d'étudier l'intérêt de son traitement en évaluant sommairement son impact sur le produit et sur l'organisation au travers d'une phase de pré-faisabilité. A partir de cette analyse, un comité de contrôle de la configuration, une instance représentant les diverses entités de l'organisation, décidera de poursuivre ou d'arrêter le traitement d'une demande, voire de demander un complément d'information. Lorsque la poursuite du traitement est décidée, on parlera alors de l'ouverture d'une modification et la demande de modification devient une proposition de modification.

3.3.2.2 *Investigations*

La seconde phase de ce processus est la phase d'investigation ou d'instruction de la proposition de modification. Généralement, les premières ébauches de solutions sont élaborées en même temps que la formalisation de la demande. Ceci confirme donc les approches de conception stipulant que les solutions émergent en même temps que le problème se construit. Le but de cette phase d'instruction est de détailler chacune de ces alternatives tout en analysant leurs répercussions sur le projet de développement. Cette analyse se découpe selon plusieurs axes. Ce sont tout d'abord les répercussions de chaque solution sur le produit et son patrimoine informationnel qui sont étudiées. L'analyse indique les modifications touchant d'autres composants qu'est susceptible d'engendrer chaque alternative de solution. A partir de cette analyse, il devient donc possible de déterminer la répercussion de chaque solution sur les processus de l'organisation, sur les activités à reconduire ainsi que les conséquences pour chaque entité de l'organisation. Au niveau du projet, ce sont les coûts et les délais engendrés par chaque solution qui sont pris en compte. A partir de cet ensemble de solutions et leurs répercussions, c'est un processus de sélection qui est déclenché afin de choisir l'une de ces solutions à implanter. Cette tâche incombe également au comité de contrôle de la configuration. Leur décision est donc le choix d'une solution ou une demande de complément d'information impliquant un report de la décision.

3.3.2.3 *Déploiement de la solution*

Si l'une de ces solutions est acceptée, on entre alors dans la troisième phase du processus : le déploiement de la solution. Cette phase est semblable au processus traditionnel de création d'une solution mais implique la mise en place d'un échéancier pour sa réalisation. Au cours de cette phase du processus, la solution donc complètement définie et l'ensemble de sa documentation est remise à jour. L'existence de cette nouvelle solution venant remplacer une solution existante selon son effectivité est ensuite notifiée à l'ensemble des métiers concernés sur l'ensemble de son cycle de vie. En accord avec l'échéancier, cette nouvelle solution sera ensuite implantée en réponse à la demande de modification initiale.

Ce processus générique peut bien varier dans sa mise en œuvre selon l'organisation industrielle étudiée et son contexte. Ce processus sera plus amplement abordé dans le cadre du chapitre 3.

3.4 Enregistrement de l'état de la configuration : gestion des configurations de référence

L'enregistrement de la configuration permet de créer et de gérer les connaissances utiles pour effectuer les autres tâches de gestion de configuration. Ces enregistrements sont réalisés à des jalons définis du cycle de vie du produit et reconnus par tous les acteurs. Cette activité doit normalement comprendre :

- l'enregistrement de la documentation de configuration courante et approuvée ainsi que l'identification de chaque article de configuration,
- l'enregistrement et les rapports d'états des différentes propositions de modification de leur initialisation à leur approbation finale,
- l'enregistrement des résultats d'audits de configuration jusqu'à l'identification des écarts,
- l'enregistrement des états d'application des évolutions approuvées,
- la traçabilité des évolutions appliquées à chaque article de configuration,
- le compte-rendu des états d'application des évolutions que ce soit en production, en modification, en retrofit ou en maintenance.
- l'enregistrement des versionnements de la documentation.

Pour cela, l'application permettant de gérer ces enregistrements doit être conçue de manière à garantir l'unicité, la sûreté, la cohérence, la compatibilité et la mise à disposition des données de configuration. Nous verrons, dans la quatrième partie de chapitre, comment les outils PLM répondent à ces exigences. Mais quelle que soit l'application choisie, l'ensemble des informations soumises à l'enregistrement est sous la responsabilité du donneur d'ordre et doit être accessible aux sous-traitants.

3.5 Audit de la configuration : gestion des écarts entre les configurations réelles et les configurations de références

Les audits visent à identifier les écarts entre la configuration du produit telle qu'elle a été spécifiée et ses configurations à divers stades de son cycle de vie. Ces audits peuvent être effectués lors des revues de projet circonstanciées ou planifiées. Il existe deux types principaux de revues. La revue de la configuration fonctionnelle qui est un examen formel pour vérifier que la définition du produit répond aux performances et aux caractéristiques fonctionnelles spécifiées dans le référentiel antérieur. Ensuite la revue de configuration physique qui est un examen formel de la configuration du produit « tel que réalisé » afin de vérifier qu'il est conforme à son dossier de définition. Ces examens formels sont particulièrement importants lorsque le développement et la fabrication du produit s'étendent sur un délai important. Les écarts mesurés entre la configuration courante du produit et le référentiel permettront de définir les ajustements requis et mener les actions correctives nécessaires.

3.6 Gestion des données techniques

De la définition de la configuration du produit à la gestion de ces évolutions, il est possible de constater qu'il existe un lien très étroit entre la gestion de configuration et la gestion des données techniques. La gestion des données techniques pour la gestion de configuration doit supporter certaines fonctions que nous détaillons maintenant.

3.6.1 Faciliter le passage des données d'un état à un autre

Cette préoccupation constante permet d'établir des workflows plus fluides pour la transmission de données d'une activité à une autre. Les données peuvent avoir différents statuts :

- « *En cours* » (ou « *In Work* ») : Ce statut est attribué aux données qui sont encore sous la responsabilité du créateur. Elles ne peuvent pas être considérées comme "fiables".

- « *Disponible* » (« *Released* ») : Ce statut est attribué aux données « approuvées » au cours du processus de validation du sous-traitant.
- « *Soumis* » (« *Submitted* ») : Ce statut est attribué aux données « disponibles » qui sont soumises au donneur d'ordre pour approbation.
- « *Approuvé* » (« *Approved* ») : Ce statut est attribué aux données « soumises » approuvées par le donneur d'ordre en vue de leur utilisation.
- « *Archivé* » (« *Archived* ») : Si les données avec le statut « approuvé » ne sont plus utilisées, celles-ci sont archivées en suivant une procédure préalablement définie par le donneur d'ordre.

3.6.2 *Faciliter l'accès aux données en fonction des requêtes émises, des rôles des acteurs et de leurs positions par rapport aux donneurs d'ordres*

L'enjeu de la gestion des données techniques pour la gestion de configuration est de mettre à disposition des acteurs, à leur demande, des données fiables et à jour (dernière version) et présentées de manière à être utilisées efficacement par l'acteur. Ceci implique que toutes les données ne peuvent pas être diffusées à tous les acteurs.

3.6.3 *Faciliter l'échange de données par réseaux ou par supports physiques*

L'émetteur d'un document au format électronique (sur ou sans supports physiques) doit s'assurer que le récepteur est en mesure d'identifier et de lire le document.

3.6.4 *Définir des mécanismes de versionnement de données*

L'indice de versionnement d'un document doit être incrémenté à chaque fois que son contenu est revu et corrigé ; chacune des versions doit être sauvegardée en suivant les procédures associées à chaque type de documents.

3.6.5 *Etablir des liens entre la configuration du produit et la configuration des données qui le décrivent*

Un système de gestion des données techniques doit être capable de maintenir les liens clés entre les données électroniques, les mécanismes auxquels ils obéissent et la configuration réelle du produit. Ainsi, chaque document pour lequel est spécifié sa source, son type et son identifiant doit contenir des liens vers :

- le projet, le programme ou le contrat,
- l'approbation de changement d'indice de versionnement,
- le nom du produit associé,
- les effectivités,
- et les documents associés.

3.6.6 *Identifier les différents documents*

Sans entrer dans les détails, la norme ISO 10007 [ISO95] précise les informations devant permettre d'identifier un document. Ce sont :

- La source du document;
- L'identifiant du document;
- Le type du document;
- L'indice de révision du document.

Il est possible qu'un document soit décrit par plusieurs fichiers (comme les documents CAO), il est alors important de pouvoir maintenir les liens entre ces diverses entités.

Une grande partie de ces fonctions est aujourd'hui supportée, principalement en phase de développement, par les applications PLM.

4- Les outils PLM²³, des outils supportant l'activité de gestion de configuration des produits complexes en cours de développement

De manière simple, les outils PLM peuvent être définis comme des applications informatiques permettant aux acteurs de la conception de gérer les données générées au cours des phases de développement (depuis la génération des spécifications jusqu'à l'entrée dans une phase de production en séries du produit).

Ces outils ont été développés dans les années 80 afin d'améliorer les performances des processus d'ingénierie traditionnels souvent basés sur des documents au format papier. A cette époque, peu d'applications permettant de gérer les données techniques étaient disponibles sur le marché. De ce fait les entreprises étaient très souvent forcées à développer leurs propres applications souvent en liaison avec la solution CAO préalablement adoptée. Cette tendance a souvent mené à l'apparition « d'îlots d'automation » dans les bureaux d'études. De plus, avec l'essor des technologies informatiques dans les processus d'ingénierie, ce phénomène a souvent induit le développement de « traducteurs »²⁴ entre des systèmes trop souvent incompatibles. Ces traducteurs étaient la plupart du temps difficiles à maintenir et les coûts de maintien en conditions opérationnelles des applications développées en interne²⁵ devenaient vite prohibitifs.

Ainsi, à partir des années 80, émerge dans les processus d'ingénierie, une nouvelle classe d'applications appelées EDM (Engineering Data Management). Ces outils permettaient de gérer en configuration la documentation générée au cours des phases de développement. Parfois intégrées à des applications de type CAO, ces systèmes sont rapidement devenus peu facilement exploitables dans le cas de produits complexes²⁶. Les applications PLM sont ensuite apparues sur le marché pour fournir un mode de gestion des données centré sur le produit plutôt que sur sa documentation. Ces systèmes présentaient les fonctionnalités requises pour conserver, transmettre, organiser, accéder et contrôler les données relatives au produit ainsi que leurs cycles de vie. Aujourd'hui, la grande majorité de ces outils permet de gérer de manière collaborative ces types de données dans des organisations distribuées.

4.1 Les fonctionnalités principales des outils PLM

Quelle que soit l'offre des éditeurs d'applications PLM aujourd'hui présents sur le marché, il est possible de mettre en évidence les fonctionnalités génériques de ce type d'outil. Ces fonctionnalités sont regroupées selon deux grandes familles : celles dé-

²³ PLM signifie Product Lifecycle Management. Les outils désignés ainsi sont plus connus sous leur appellation française de Système de Gestion des Données Techniques (SGDT). Dans le monde Anglo-Saxon, ces applications sont nommées PDM (Product Data Management) avant d'intégrer les concepts de gestion de cycle de vie du produit pour devenir des PLM.

²⁴ Plus familièrement connus sous le nom de « moulinettes » qui sont des applications intermédiaires permettant à d'autres applications de rendre leurs informations exploitables l'une vis-à-vis de l'autre.

²⁵ Il est souvent fait allusion à ce type d'application sous le terme de « LEGACY » qui évoque la notion d'héritage d'un passé informatique.

²⁶ Avant l'introduction des supports numériques, la documentation technique livrée aux compagnies aériennes en même temps que l'appareil représentait une masse de l'ordre de 2 tonnes !

diées aux utilisateurs et les fonctions d'utilité inhérentes au système qui permet de supporter la première famille de fonctionnalités.

4.1.1 Les fonctionnalités dédiées aux utilisateurs

4.1.1.1 Coffre-fort de données et de documents (« VAULT »)

Les données et les documents sont stockés dans un coffre électronique qui peut être considéré comme un coffre-fort, aussi dénommé « vault » accessible grâce à un mécanisme de « Check-In / Check – Out ». A un même moment, il n'autorise l'accès à une donnée ou à un document qu'à un seul utilisateur si ce dernier bénéficie des privilèges requis et que la donnée ou le document a été validé.

4.1.1.2 Gestion de la structure produit

Puisque les outils PLM sont centrés sur le produit, ils offrent la possibilité de gérer les structures produits. Ces structures sont également souvent dénommées « Bill Of Materials » bien que ce terme se réfère le plus souvent aux besoins des phases de production. Afin d'optimiser la gestion du cycle de vie du produit, différentes structures ont été implantées pour fournir aux utilisateurs des vues du produit en adéquation avec leurs besoins (vue « As designed », vue « As planned »,...). De telles structures constituent généralement une décomposition descendante : du produit intégré jusqu'aux composants élémentaires (ou ascendantes du point de vue manufacturier). La gestion de cette structure est assurée au travers des processus de gestion des modifications et de mise à disposition des données.

4.1.1.3 Gestion des workflows et des processus

La grande majorité des processus implantés dans les outils PLM sont supportés par des technologies workflow. Celles-ci permettent à l'organisation de s'assurer du bon séquençement des activités de gestion de configuration conformément aux procédures établies. Les workflows définissent les séquences d'actions, avec allocation des acteurs, afin de réaliser une tâche ou prendre une décision. Ils sont généralement définis par les administrateurs et les acteurs impliqués sont automatiquement alertés des activités qu'ils doivent réaliser au travers d'un processus de notification utilisant le plus souvent les messageries électroniques.

4.1.1.4 Classification et recherche d'informations

Toutes les applications PLM fournissent les fonctionnalités nécessaires pour de définir des attributs spécifiques à l'organisation pouvant être rattachés aux objets de la structure produit. Il est alors possible de rechercher et d'identifier les objets selon ces attributs. Aujourd'hui, les systèmes les plus avancés offrent la possibilité de définir et gérer des structures de classification rendant ainsi possible la gestion de familles ou de gammes de produits.

4.1.1.5 Gestion des programmes et des projets

Certains outils présentent aujourd'hui les fonctionnalités nécessaires pour gérer des structures d'activités de la même manière que les structures produit. Il devient donc possible de coordonner les processus relatifs au développement du produit et d'allouer des ressources selon les impératifs du projet de développement. Par conséquent, ils fournissent les éléments temporels requis pour la gestion des projets et des programmes avec, notamment, l'établissement de jalons de référence.

4.1.2 Les fonctions d'utilité

Ce type de fonction fournit le support nécessaire pour l'utilisation des systèmes PLM dans le cadre des processus de développement. Ces fonctions sont donc liées avec l'environnement dans lequel le système est utilisé et, parfois, ne sont pas directement accessibles aux utilisateurs.

4.1.2.1 Communication et notification

La notification automatique des événements critiques apparaissant dans le processus signifie que tous les acteurs (ou un groupe d'utilisateurs selon les rôles définis) sont informés de l'état courant du projet et du produit en cours de développement. La notification est rendue possible par l'utilisation des messageries électroniques. Par conséquent, les retards ou les problèmes de communication entre acteurs sont minimisés contrairement aux possibilités offertes par les procédures basées sur les documents au format papier.

4.1.2.2 Transport des données

L'ensemble des données conservées ne sont accessibles qu'au travers de l'application PLM. L'utilisateur n'a donc pas besoin de savoir dans quelle base est conservée une donnée. L'application conserve une trace de la localisation des données permettant ainsi à l'utilisateur d'y accéder à partir de leurs références ou identifiants. Cette fonction diminue donc les temps d'accès aux données.

4.1.2.3 Echange et traduction des données

Les administrateurs de ce genre d'applications, sont généralement en mesure de définir les convertisseurs de formats de données utilisés entre les applications supportées par les outils PLM et ainsi de contrôler les formats en sortie (formats neutres, formats d'échange STEP, etc.). Cette traduction des données peut être déclenchée automatiquement par le système.

4.1.2.4 Visualisation

Les outils PLM considèrent les fichiers aux formats raster, vectoriel ou vidéo de la même manière que tout autre type de données. Apport permettant aux utilisateurs d'accéder aux modèles 2D et 3D des composants lors de la structuration de leurs tâches.

4.2 Contribution des outils PLM à la gestion de configuration

De manière objective, les outils PLM présentent à la fois des avantages ainsi que des désagréments pour l'entreprise étendue. La mise en évidence des limitations de ces outils permettra notamment d'éviter certains écueils lors de leur introduction.

4.2.1 Apports des outils PLM

De part les fonctionnalités qu'ils proposent les outils PLM sont des supports maintenant devenus indispensables pour supporter l'ingénierie concourante [MAU96]. Puisque ce sont des applications informatiques basées sur des processus automatisés ainsi que des données numériques et non plus sur des procédures «papiers», ils rendent possible la parallélisation des activités de développement ainsi que la consultation simultanée des informations liées au produit [CHA95]. Cette dernière caractéristique est d'autant plus attrayante pour les entreprises étendues que ces applications sont actuellement essentiellement basées sur des architectures distribuées.

Ils permettent également de supporter la gestion d'un projet de développement par la mise en œuvre de jalons déterminant l'évolution de la configuration du produit dans le temps. Il devient alors possible pour la direction du programme de fixer les objectifs des grandes phases du projet et de contrôler son avancement [PIK96]. A l'issue de chacune de ces étapes, les acteurs ont la possibilité (s'il en ont le droit) d'accéder aux résultats des tâches mis à disposition par les acteurs au travers de l'application [MES02]. Au delà du contrôle des informations créées au cours du processus de développement, les applications PLM garantissent le contrôle de l'ensemble de la documentation générée au cours du projet. Ce contrôle sous-entend l'intégrité et la traçabilité des documents de développement au cours du cycle de vie du produit.

Les processus documentaires ne sont cependant pas les seuls processus supportés par les outils PLM. Ces derniers permettent plus largement de structurer l'ensemble des processus qui participent à la construction et à l'enrichissement de l'architecture du produit. Ainsi, grâce à l'introduction des workflows et des fonctionnalités de notification, il devient possible de réduire les délais de réalisation d'une activité. Au final, cette réduction conduit à un raccourcissement du cycle de développement d'un nouveau produit et participe donc également à la réduction du délai de mise sur le marché (Facteur « Time To Market »).

Cependant, les applications PLM présentent également des limitations qui peuvent très vite devenir des écueils si elles ne sont pas prises en compte lors de leur introduction.

4.2.2 Limitations des outils PLM

Aujourd'hui, les limitations que présentent les outils PLM sont essentiellement liées à leur acceptation par les acteurs et donc à leurs modalités d'introduction dans les entreprises (se reporter à la partie 4.3 de ce chapitre pour plus de détails).

S'ils permettent actuellement de gérer l'ensemble des informations générées lors du processus de développement, la richesse des fonctionnalités et des informations qu'ils comprennent peuvent être difficiles à appréhender par un utilisateur. Comme nous l'avons vu précédemment, les PLM fédèrent les fonctionnalités auparavant supportées par des applications disparates répondant à des besoins métiers spécifiques. Le passage de ces applications à un outil PLM peut donc constituer une difficulté pour les utilisateurs dans la réalisation de leurs tâches quotidiennes. De plus, ces applications peuvent être considérées comme des outils « fermés », laissant peu de marge de manœuvre à l'utilisateur. Cette caractéristique s'explique notamment par la rigueur imposée par ce type de gestion. Ainsi, il peut arriver que les concepteurs impliqués dans le processus de développement, utilisateurs de ce type d'outils, aient l'impression de passer plus de temps sur ce type d'application plutôt qu'à réellement concevoir. Cette activité constitue pourtant le cœur de leurs métiers et l'essentiel de la valeur ajoutée au produit.

Les outils PLM rendent les données accessibles mais la recherche d'une donnée précise peut être problématique pour l'utilisateur. En effet, la localisation d'une information liée au produit dans son contexte ainsi que sa représentation posent aujourd'hui des difficultés [HUG01].

D'autres limitations, cette fois d'ordre technologique, peuvent présenter des difficultés lors de l'introduction et de l'utilisation des outils PLM. Tout d'abord, le couplage entre deux applications reste, à l'heure actuelle, un problème et ne peut être résolu qu'au prix de longues heures de développement. En effet, la lecture par un PLM des données

produites par un autre système (transmises ou issues d'une même base) implique que les deux modèles de données, sur lesquels ils reposent soient compatibles. Lorsque ce n'est pas le cas, des adaptateurs doivent être développés.

Parallèlement, des problèmes similaires persistent pour partager des données entre les applications de type CAO utilisées lors des phases de développement. Cet état de fait peut parfois poser des problèmes dans le cas d'une entreprise étendue faisant intervenir des sous-traitants lors de la conception de nouveaux produits. Cette affirmation est toutefois nuancée lorsque l'entreprise privilégie les offres des grands éditeurs proposant des produits CAO et PLM.

Enfin, les problèmes d'ordre économiques doivent également être pris en compte lors de l'implantation d'un outil PLM. En effet l'acquisition de ce type d'outil ainsi que son adaptation aux processus de l'organisation est un projet d'introduction coûteux. Le retour sur investissement à moyen terme doit donc être clairement évalué afin de ne pas pénaliser les projets de développement en cours

Dans le troisième chapitre, nous soulignerons d'autres limitations de ces outils mais cette fois par rapport aux fonctionnalités qu'ils offrent pour le traitement des modifications. Cependant, quel que soit le point de vue traité, certaines précautions doivent être prises lorsqu'est mené un projet d'introduction d'une application dans une entreprise.

4.3 La mise en place d'un outil PLM

L'introduction d'une application PLM est stratégique pour une entreprise. Un certain nombre de précautions doivent donc être prises afin de garantir les performances de l'application et son appropriation par les acteurs tout en minimisant les impacts sur les processus de l'organisation. Afin d'élaborer cette stratégie, des points incontournables doivent être examinés [PIK97].

Tout d'abord, une cible doit être définie pour l'introduction. La cible est le périmètre d'utilisation de l'outil duquel seront dérivées les fonctionnalités de l'application PLM à implémenter. Dans certains cas, une organisation choisira d'implémenter l'ensemble des fonctions de l'application PLM afin d'optimiser l'ensemble des performances de son processus de développement. Dans d'autres cas, ce sera un module particulier de l'application tel que celui de traitement des modifications qui sera privilégié afin de répondre à un besoin précis. Enfin, dans d'autres cas, l'outil PLM peut être utilisé comme une interface entre plusieurs entités de l'organisation afin de partager des données issues d'un processus distribué ou pour échanger des données entre deux processus consécutifs.

Ensuite, c'est le degré de changement requis des processus et des infrastructures de l'organisation qui doit être évalué. Cette évaluation permet, en outre, de déterminer les avantages qu'apportera l'application PLM par rapport aux méthodes de travail actuelles. C'est au cours de cette phase que seront donc revus les processus de l'organisation. Une méthode classique pour adapter les processus de l'organisation à la future utilisation de l'outil PLM est la ré-ingénierie de processus (plus connue sous sa forme anglo-saxonne Business Process Re-engineering ou BPR). Les méthodes proposées dans le cadre de cette pratique permettront d'adapter les processus et l'organisation en fonction des fonctions de l'outil PLM sélectionné. Tenter de transposer les processus de l'organisation sans y apporter de modifications ou d'adaptations conduit généralement à de faibles gains de performances ou dégradés par rapport aux be-

besoins. En marge des processus, ce sont les impacts sur les applications existantes qui doivent être pris en compte. C'est-à-dire les processus supportés et les données couvertes par le « legacy » rentrent ou non dans la future application PLM. La couverture des mêmes processus et des données par la même application mettra en évidence des problèmes dans l'utilisation des données par les acteurs du développement.

L'ampleur du changement doit également être prise en compte. L'ampleur dépend du risque qu'est en mesure de prendre l'entreprise lors du déploiement de l'application PLM. Ainsi, certaines organisations privilégieront le déploiement d'une application pilote sur un projet de développement particulier alors que d'autres opteront pour un déploiement à grande échelle dans l'organisation. Bien sûr, la première alternative semble moins risquée et permet des ajustements avec des conséquences minimales sur le projet. Toutefois, lors du déploiement et sur un même projet deux systèmes seront utilisés en parallèle contraignant ainsi les disponibilités des utilisateurs finaux. De plus, il peut arriver que les processus ainsi que les liens mis en place pour le développement de l'application pilote soient difficiles à étendre lors du déploiement final. Dans les deux cas, la criticité des projets de développement en cours influera sur le succès de l'introduction de l'application qui peut mettre à mal la stratégie de l'entreprise. Un autre facteur à prendre en compte dans la mesure de l'ampleur du changement lié à l'introduction de l'outil est le degré de personnalisation nécessaire de l'application PLM requis pour une adaptation efficace aux besoins de l'organisation. La personnalisation de l'outil générique proposé par l'éditeur peut conduire à la consommation d'un nombre d'heures de développement conséquent si elle est mal maîtrisée.

L'introduction d'une application PLM peut être conduite avec la participation des futurs utilisateurs ou avec l'implication d'experts. Dans le premier cas; les connaissances des utilisateurs seront utilisées afin de garantir la mise en place des fonctionnalités nécessaires mais aussi pour contribuer à l'acceptation de l'outil. De plus, cette organisation permet d'inclure la spécificité des savoirs faire de l'entreprise dans le développement des fonctionnalités. C'est parfois ces difficultés qu'il est difficile pour les experts d'appréhender même si leur recul peut leur permettre une vue d'ensemble de l'organisation et de se défaire des tendances « partisans » qui peuvent parfois opposer certains métiers concernés par le déploiement.

Enfin, le dernier facteur critique est le temps de déploiement d'une application PLM. Un déploiement rapide réduit les problèmes liés à l'utilisation concourante de plusieurs applications réalisant les mêmes fonctions et permettra à l'organisation de profiter rapidement des bénéfices apportés par le PLM. Cette approche reste toutefois risquée. Par conséquent, il est préférable d'élaborer un plan de déploiement de l'application en fonction de l'infrastructure de l'organisation et de ses projets de développement en cours. Un plan de déploiement définit la stratégie de déploiement en tenant compte de l'architecture technique des outils de l'organisation et définit une chronologie de mise en place des liens entre les applications existantes et le PLM. Une telle chronologie s'appuiera, bien sûr, sur la criticité des projets de développement en cours dans l'organisation. De plus, de tels plans prennent en compte, dès le début du projet, les futurs besoins en formation des futurs utilisateurs en vue d'une utilisation optimale de l'outil.

5 Problématiques abordées

Si la gestion des modifications relatives au produit entre aujourd'hui clairement dans le champ des services visés par les outils PLM, il est important de s'interroger sur

l'adéquation entre les fonctionnalités qu'ils offrent par rapport aux besoins des utilisateurs impliqués dans le développement de produits aéronautiques. Il apparaît, en effet que l'ensemble des besoins exprimés par les acteurs ou identifiés au cours de différentes études ne sont pas couverts par les applications PLM. Mais, au-delà de cette interrogation sur l'adéquation entre l'application et les besoins, ces travaux s'attachent principalement à apporter des éléments de réponse s'articulant autour de cinq problématiques majeures.

Dans un premier temps, nous tentons de comprendre, dans sa globalité, le phénomène des modifications dans le processus de développement d'un produit complexe. Cette compréhension englobe l'apparition des demandes des modifications, leurs conséquences potentielles ainsi que le comportement des composants du produit lorsqu'une modification leur est appliquée. Parallèlement à l'étude de ce phénomène, ce sont les réponses mises en place par les organisations industrielles pour traiter ces demandes et limiter leurs conséquences qui monopoliseront notre attention.

A partir des descriptions des processus de traitement des modifications et des fonctionnalités des outils PLM, nous identifierons les limitations actuelles de ces derniers. Cette analyse nous permettra ultérieurement d'asseoir notre proposition d'application pour un traitement « efficace » des modifications.

Pour cela, nous nous attacherons ensuite à définir des stratégies de traitement à un niveau organisationnel pouvant être déclinées au niveau des processus. Cette définition nous conduira à nous interroger sur les concepts d'efficacité, d'efficience, de « front-loading » et d'apprentissage.

La définition de ces stratégies sera ensuite utilisée pour positionner les contributions proposées dans ce domaine et en les raffinant selon quatre axes principaux : l'organisation, les processus, les méthodes et les outils. Cette « carte » des contributions, nous permettra d'identifier les axes qui n'ont pas (ou peu) aujourd'hui été explorés et donc de positionner notre propre contribution.

Cette contribution pour le traitement des modifications aborde de nombreuses problématiques souvent issues du monde de la conception. Certains éléments seront illustrés par une proposition d'outil, visant à valider nos travaux, nous adresserons les problématiques suivantes :

- le pilotage et la supervision des processus de traitement.
- la définition de processus de traitement adaptés aux demandes de modifications ainsi qu'à leurs contextes d'émission. On rejoindra ici des problématiques liées à la l'établissement et la gestion des stratégies.
- la collaboration entre les acteurs pour le traitement d'une demande modification. Notre but étant d'examiner la manière dont peuvent être supportés au travers d'une application des processus fortement collaboratifs,
- l'analyse d'impacts des demandes de modification et des répercussions des solutions techniques qui en découlent. Ceci nous permettra de comprendre les liens qui unissent les composants d'un système complexe.
- l'évaluation des solutions techniques en fonction des critères liés à leurs influences sur les performances du produit, son exploitation en compagnie et sur les coûts d'implantation. Ici ce sont les problématiques liées aux techniques d'évaluation multicritères que nous aborderons.

Enfin, le dernier volet de nos travaux sera relatif au prototype d'application développé à partir de cette proposition. Il sera relatif à l'analyse de la démonstration des concepts proposés ainsi qu'à la faisabilité industrielle pour un constructeur aéronautique.

6 Conclusions

Il est très difficile de considérer la gestion des modifications indépendamment des processus de gestion de configuration. Le but de ce second chapitre était donc d'introduire cette discipline en prenant soin de souligner ses enjeux et ces fondements historiques. Depuis ses origines (les industries militaires et spatiales américaines), la gestion de configuration devient incontournable pour le pilotage des projets de développement dans l'entreprise-étendue mais surtout pour structurer et contrôler les évolutions des produits complexes.

Aujourd'hui, les outils PLM sont les applications informatiques qui supportent en partie les processus de gestion de configuration pour les produit en phase de développement. Malgré les avantages qu'elles présentent, un certain nombre de limitations doivent être prises en compte notamment lors de leur introduction.

Dans la suite de ces travaux, nous nous concentrons essentiellement sur le processus de gestion des modifications.

Chapitre 3

Maîtriser et améliorer le traitement des modifications

1 Introduction

La gestion des modifications ne peut plus guère être considérée comme une simple procédure administrative. Elle est en effet devenue un processus stratégique pour les organisations garantissant notamment le développement efficace de nouveaux produits adaptés aux besoins d'une clientèle diversifiée. La gestion des modifications doit garantir la prise en compte, dans des délais toujours plus courts, d'opportunités d'améliorations ou de corrections d'anomalies aux conséquences inacceptables. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant que la gestion des modifications fasse aujourd'hui l'objet de l'attention de nombreux industriels et de projets d'amélioration continue.

Dans ce chapitre, nous nous attachons, dans un premier temps, à décrire les comportements des modifications puis, dans un second temps, à expliciter les difficultés que pose le traitement d'une modification dans le contexte industriel décrit dans le chapitre 1. Suite à la mise en lumière de ces difficultés, une cartographie précise des besoins liés à la gestion des modifications est établie afin de positionner les contributions détaillées dans la littérature. Au cours de la revue des contributions, une différence est faite entre celles qui apportent une optimisation directe du processus et celles qui y contribuent indirectement. La revue de ces contributions permettra ensuite de proposer dans le chapitre 4 une méthodologie de gestion des modifications destinée à l'industrie aéronautique et plus particulièrement pour les appareils en cours de développement.

2 Comprendre le phénomène et la manière de le traiter

Dans le second chapitre, les causes et les conséquences des modifications ont été détaillées. Celles-ci sont sommairement résumées par la Figure 21.

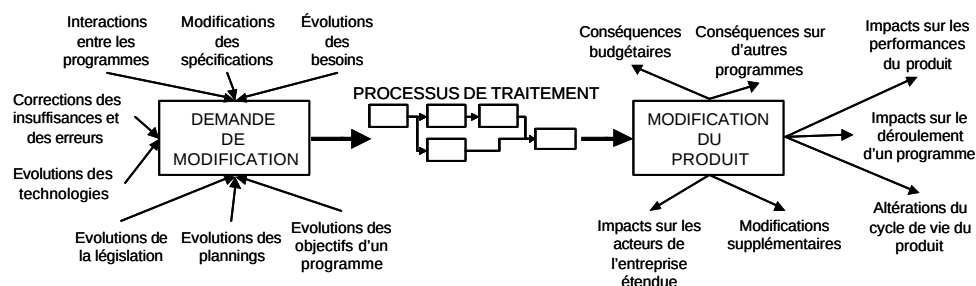


Figure 21 : Causes et conséquences des modifications

Toutefois, la seule analyse des causes et des conséquences des modifications ne suffit pas à appréhender le phénomène dans son ensemble. En effet, les causes et les conséquences des modifications ne sont pas les seuls facteurs influant sur les performances de leurs traitements. Dans un premier temps, cette partie se focalise sur le comportement possible d'un composant lorsqu'il est impacté par une demande de modification. Dans un second temps, ce sont les évolutions récentes des modes de gestion qui sont abordés. Ces derniers visent très souvent à augmenter les performances de traitement mais aussi à limiter l'incidence des facteurs influents.

2.1 La modification : un phénomène aux multiples facettes

Selon le type de modification et les propriétés du système (ou sous-système) remis en cause, un traitement peut être long et onéreux. Par conséquent, la maîtrise d'une modification et de ses effets peut être problématique.

2.1.1 Comportement d'un système complexe par rapport à une modification

Lorsqu'il est impacté par une modification, un système (ou un composant) peut se comporter de différentes manières [ECK01] : il peut absorber la modification, c'est à dire que sa modification n'impliquera pas la modification des systèmes qui lui sont liés ou au contraire la propager à un ou plusieurs éléments avec lesquels il est en relation. Dans le premier cas, le traitement s'avère simple puisque limité tandis que dans le second cas il peut devenir long et onéreux puisqu'il implique également le traitement de modifications relatives à d'autres systèmes. Par rapport aux modifications susceptibles de les impacter, on distinguera trois comportements possibles des éléments d'un système :

- *Les absorbeurs.* Ils peuvent absorber plus de modifications qu'ils n'en causent eux-mêmes. Très peu d'éléments composant un système complexe sont généralement des absorbeurs.
- *Les multiplicateurs.* Ils génèrent plus de modifications qu'ils en acceptent eux-mêmes. C'est généralement vrai pour les systèmes supportant un grand nombre de fonctions ainsi que pour ceux incorporant un nombre élevé d'éléments logiciels.
- *Les porteurs.* Ils propagent autant de modifications qu'ils en acceptent eux-mêmes. Les composants avec une géométrie simple, tels que les éléments de fixation, font généralement partie de cette catégorie.

Ces comportements des systèmes et de leurs composants dépendent généralement de trois facteurs. Le premier est l'existence de liens entre les composants du système. Ces liens permettent de véhiculer une modification d'un composant à un autre lors d'une propagation. Le second facteur est la marge de tolérance qui est associée aux caractéristiques d'un composant. En effet, si la modification d'une caractéristique d'un composant va au-delà de la tolérance qui lui a été assignée, alors la modification sera propagée vers d'autres composants car la définition initiale des tolérances garantit le bon fonctionnement du système. Enfin, le troisième facteur est temporel puisque la définition des liens et des tolérances dépend de l'avancement du produit dans son cycle de vie, notamment au cours des phases de développement. Il est donc possible de dire que le comportement d'un système complexe aux sollicitations extérieures dépend en grande partie de la nature des interfaces (physiques ou théoriques) entre ses composants et de leurs évolutions dans le temps.

En examinant le comportement d'un système vis-à-vis des modifications qui l'impactent, il est possible de dégager deux pistes de travail contribuant à une amélioration sensible du traitement des modifications : d'un côté, il est possible de s'intéresser à la modélisation des liens entre sous-systèmes, d'un autre côté à la définition des tolérances des composants, qui consiste alors à attacher des degrés de liberté aux composants d'un système.

2.1.2 *Lenteur du processus de traitement*

Dans la plupart des cas, il apparaît que, par rapport à d'autres processus mis en œuvre au cours des phases de développement d'un nouveau produit, le traitement d'une modification peut-être considéré comme lent. Cette lenteur s'explique par le fait qu'une modification soit la remise en cause d'une configuration définie, cohérente et validée du produit (ou d'un système qui le compose). Par conséquent, le traitement d'une modification doit étroitement s'appuyer sur les décisions prises par les acteurs impliqués dans l'élaboration de la configuration initiale. Ce traitement doit également tenir compte de l'état d'avancement du projet et des décisions d'autres fonctions de l'entreprise dédiées à la gestion des projets de développement.

D'un point de vue technique, les acteurs, dont les connaissances peuvent relever de différents métiers, sont amenés à collaborer et à échanger des points de vues afin de faire émerger un consensus. Ce dernier devra ensuite être validé par les responsables du projet (tant sur les plans financiers que des plannings). Des itérations sont donc nécessaires avant qu'une décision soit prise [TER99].

Les échanges, les prises de décisions et les itérations sont donc des phases incontournables du processus de traitement dont les délais d'exécution sont difficilement maîtrisables en particulier dans le cas où la disponibilité des acteurs concernés est restreinte.

2.1.3 *Problèmes de disponibilité et de congestion*

Très souvent, les acteurs impliqués dans le traitement d'une modification sont parallèlement affectés à des projets de développement. Leur disponibilité pour le traitement des modifications est donc fortement contrainte par leurs affectations à des projets de développement. Ainsi, les concepteurs sont dans l'obligation de « jongler » entre les projets de développement en cours et les modifications à apporter au produit selon les priorités immédiates. Par conséquent, il peut arriver que des activités liées au traitement des modifications soient mises en attente afin de répondre à des sollicitations pressantes dans le cadre d'un projet. Ces situations peuvent aboutir à l'apparition de phénomènes de congestion dans le processus.

Loch et al. dans [LOC99] identifient des stratégies pouvant contribuer à la réduction de ces problèmes :

- *Flexibilité des disponibilités.* Le but de cette stratégie est de coordonner la disponibilité des acteurs avec les sollicitations liées au traitement des modifications. Cette stratégie implique la réduction des contraintes horaires contrariant les disponibilités des concepteurs en adaptant le temps de travail des concepteurs aux charges de travail à réaliser.
- *Regroupement des tâches.* Le but de cette stratégie est de regrouper, quand cela est possible, en une seule et même tâche des tâches qui étaient auparavant assignées à plusieurs entités de l'organisation. Elle permet d'éviter les temps

d'attente précédents la réalisation d'une tâche. Cette stratégie consiste à faire du traitement par lots, à l'instar des systèmes de production.

- *Équilibrage des charges.* Comme dans tout processus, certaines activités du processus de traitement des modifications peuvent être considérées comme des goulots d'étranglements. Afin de lever cette limitation, la stratégie proposée préconise un équilibrage entre la réalisation du traitement et les ressources compétentes de l'organisation.
- *Enrichissement des compétences des concepteurs.* Cette stratégie vient en complément de l'équilibrage des charges. Elle vise à construire un «pool» de compétences réduisant ainsi la spécialisation des concepteurs. Par conséquent, une tâche peut être traitée par un nombre plus élevé d'acteurs. Le risque associé à cette stratégie est de réduire les aptitudes d'un concepteur à résoudre des problèmes pointus. Il faut noter que cette stratégie de «polyvalence des acteurs» est analogue à celle conduite pour les opérateurs dans les systèmes de production à fin des années 80. On peut en escompter une plus grande flexibilité du système productif.
- *Estimation réaliste des objectifs.* Il arrive très fréquemment que les objectifs (notamment les temps de réalisation) ne soient pas atteints car trop peu réalistes. Le but de cette stratégie est donc d'affiner les estimations des temps de traitement afin qu'elles restent en accord avec la réalité.

2.1.4 Nombre élevé de modifications

Dans certaines organisations, chaque demande de modification est traitée individuellement. On peut s'interroger sur l'opportunité de mettre en place des stratégies de groupage qui permettent de traiter plus efficacement les demandes mais également d'être plus efficient dans l'implémentation d'un train de modifications. Le traitement individuel de chaque demande de modification augmente inévitablement les temps de traitement des modifications en cours. Stratégiquement, Il convient donc de regrouper les modifications selon différents critères :

- *L'objet de la demande.* C'est-à-dire regrouper les modifications relatives aux mêmes systèmes ou qui ont pour origine le même fait technique afin de les traiter comme une seule modification. Ce type de regroupement permet d'apporter des solutions cohérentes entre elles en fonction des problèmes constatés.
- *Le produit concerné.* Lorsque le porte-feuille de produits de l'organisation est conséquent et que pour un même produit plusieurs modèles et/ou versions sont disponibles, il convient de regrouper les demandes de modification relatives aux mêmes références afin de conserver la cohérence du catalogue.
- *Les priorités.* Afin de factoriser les efforts de développement mais aussi pour limiter l'impact sur les charges des fournisseurs et des acteurs, les modifications peuvent être groupées selon la date à laquelle une solution technique est requise.

Chez certains constructeurs aéronautiques, ces regroupements sont effectués au travers des calculs d'effectivités. Ils permettent, à partir des demandes de modifications, de leur date d'émission, des systèmes qu'elles impactent et des produits concernés, de déclencher un processus de traitement aboutissant à la création d'une solution technique répondant à plusieurs demandes.

2.2 Evolutions du processus de traitement des modifications

Mettre en avant les disfonctionnements actuels des processus de traitement des modifications n'est valable que dans la mesure où l'historique de ces processus est pris en compte. En effet, la configuration actuelle de ces processus est le reflet de changements organisationnels et des évolutions des méthodes de conception poussés par la maîtrise des facteurs de compétitivité.

2.2.1 *D'un processus qualité vers un processus d'ingénierie*

A l'origine, les processus de gestion des modifications étaient dédiés au contrôle des changements à l'interface entre les bureaux d'études et les unités de production [COU92]. Une procédure claire était donc requise pour contrôler ces évolutions. Généralement gérées par le service qualité, de telles procédures visaient uniquement à garantir la maîtrise et le transfert de la documentation générée au cours du traitement. Avec ce type de procédure, ce sont donc les préoccupations de traçabilité et de communication qui étaient mis en avant.

Par la suite, afin de limiter les conséquences négatives des modifications, des méthodes qualité ont été introduites dans les processus de développement (DFMA, Taguchi). Les organisations industrielles sont donc passées d'une gestion procédurière à une gestion plus proactive des modifications.

Aujourd'hui, pour maîtriser au mieux leurs conséquences, la gestion des modifications s'appuie plus sur des méthodes de simulation permettant d'analyser plus finement les impacts d'une demande sur les produits, les processus et l'organisation. La documentation générée reflète donc ces analyses notamment conduites au travers d'applications telles que la maquette numérique permettant de visualiser les interférences entre les composants d'un produit. Les moyens de simulation présentent l'avantage de simuler rapidement une modification et de visualiser ses impacts sur une échelle de temps réduite en se basant sur des modèles virtuels du produit. Le processus de traitement des modifications est donc devenu un processus d'ingénierie à part entière dont le déroulement peut être supporté par la mise en place d'applications dédiées.

2.2.2 *D'une procédure papier vers un outil intégré*

Historiquement, la gestion des informations générées au cours du traitement d'une modification s'appuyait sur des procédures au format papier circulant entre les unités concernées de l'organisation [DAL82]. Selon le nombre d'unités concernées et les bouclages nécessaires, les délais de traitement des modifications pouvaient être conséquents [KID00]. Watts dans [WAT84] met d'ailleurs en évidence le modèle « 40-40-40 » qui correspond à quarante jours pour identifier une modification, quarante jours pour traiter la procédure papier et quarante jours pour implanter la solution répondant au problème initial.

Avec les apports des technologies de l'information, et pour s'affranchir de ces limitations, des applications informatiques dédiées au traitement des modifications ont été mises en place. D'abord de simples applications de gestion documentaire, elles se sont vite intégrées à des outils de gestion du patrimoine informationnel du produit tel que les PLM (Cf. chapitre 2). Selon Huang et al. [HUA98] [HUA99], à partir d'enquêtes menées dans l'industrie anglaise, les entreprises recherchent principalement, au travers de ces applications, un support dans la réalisation des activités suivantes :

- la gestion formelle des modifications,
- l'établissement d'une procédure claire,

- la formalisation et la soumission de demandes de modification,
- la réception, l'enregistrement, la mise à jour et la conservation des modifications et de leurs traitements,
- la possibilité de développer des solutions alternatives en réponse à une demande de modification,
- l'analyse des impacts et des conséquences des modifications,
- la détermination des effectivités des solutions,
- la notification automatique des acteurs concernés.

Malgré l'automatisation de certaines activités, les processus mis en œuvre dans ces applications restent le reflet des procédures traditionnelles. Cette simple automatisation d'un processus papier laisse peu de place à une optimisation du traitement.

2.2.3 D'une organisation cloisonnée vers la mise en place d'un processus transverse

Dans le passé, l'organisation des unités au sein de l'entreprise était cloisonnée et adaptée au développement séquentiel de nouveaux produits. Le processus de traitement des modifications se déroulait selon le même modèle. Ainsi, une fois la tâche d'une unité effectuée, la modification était transmise à l'unité suivante. Ce mode de fonctionnement induisait donc de coûteuses itérations entre services afin de pallier aux problèmes rencontrés et faire face aux ajustements.

Grâce au développement de l'ingénierie concourante et à la mise en place d'équipes de développement pluridisciplinaires, il est aujourd'hui plus performant de s'appuyer sur la collaboration entre acteurs afin de traiter une modification. De plus, selon ce mode d'organisation, il devient plus facile pour les acteurs de faire coïncider les objectifs de leurs fonctions avec les objectifs de traitement d'une modification [PIK98]. Les cycles de traitement deviennent plus courts et les itérations dans les modèles moins fréquentes.

3 Cartographie du besoin lié au traitements des modifications

Toutefois, malgré ces évolutions, la gestion des modifications reste problématique. Afin de palier à ces difficultés de nombreuses optimisations ont été proposées. Il est aujourd'hui nécessaire de les confronter aux besoins industriels des acteurs afin de les évaluer mais aussi afin de découvrir de nouvelles voies d'investigations et positionner de futures propositions.

Mais, par rapport à l'activité de gestion de configuration, l'ensemble des besoins ne peuvent pas être positionnés au même niveau. Le premier niveau de besoins est générique. Ces besoins sont décrits sous la forme de stratégies de gestion applicables quel que soient l'industrie et la phase du cycle de vie du produit concernée. Au second niveau ce sont les besoins relatifs au traitement des modifications du produit en phase de développement qui sont mis en évidence. Puis, au troisième niveau, les besoins du second niveau sont raffinés afin de mettre en évidence les spécificités de l'industrie aéronautique. Les deux derniers niveaux adressent donc des besoins plus tactiques et opérationnels.

3.1 Besoins génériques liés au traitement des modifications

A un niveau générique, le besoin peut être exprimé sous la forme de stratégies qui devront guider la définition ainsi que la mise en œuvre des procédures de gestion des modifications quelles que soient l'industrie et la phase du cycle de vie du produit concernées.

En se basant sur les travaux de Fricke et al. [FRI00], les stratégies contribuant à une gestion plus performante des modifications peuvent être regroupées selon deux catégories

- celles relatives au processus de conception et qui visent à limiter par anticipation le nombre de modifications à traiter,
- celles qui sont directement liées au processus de gestion des modifications et dont le but est d'optimiser les performances de ce dernier.

3.2.1 Prévention de l'apparition des modifications

Cette stratégie vise à prévenir l'apparition de modifications, au cours des phases de conception et de développement, en éliminant les sources possibles d'erreurs ou de futures remises en cause. De cette manière, il est possible de s'affranchir des coûts supplémentaires liés à la découverte tardive d'une modification. Cette stratégie impose donc la caractérisation, au plus tôt dans le cycle de vie du produit, des sources de modifications afin de définir les moyens de prévention adéquats.

Comme le soulignent Clark et Fujimoto dans [CLA91], environ deux tiers des modifications pourraient être éliminées par une meilleure communication entre métiers et plus de discipline dans la réalisation des tâches. Ainsi, toute amélioration visant à supporter les échanges entre les acteurs ou à établir des procédures de travail claires et acceptées par l'ensemble des acteurs favorise la prévention des modifications. Pour l'établissement des procédures de travail, l'introduction de démarches qualité dans les phases de conception et de développement peuvent être d'une grande aide. En effet, des analyses telles que l'AMDEC²⁷ permettent d'identifier et d'éliminer les défaillances, les problèmes et les erreurs d'un système ou d'un processus avant que celui-ci ne soit clos. D'autres méthodes comme l'approche TOPS-8D (Team Oriented Problem Solving – Eight Dimensions) [CHA01] visent les mêmes objectifs. C'est une méthode systématique permettant de décrire, analyser et résoudre collaborativement les problèmes récurrents. Initialement développée par FORD, cette approche a largement été adoptée par les compagnies aériennes afin de déterminer les causes d'incidents découverts lors des phases d'exploitation et de tests.

D'autres méthodes (Cf. partie 4.2) portent sur des prises tardives de décisions dans les processus de conception lorsque plus d'informations matures sont disponibles. Ce type de démarche impose toutefois de pouvoir geler tardivement la conception et de maîtriser la réalisation parallèle de plusieurs tâches. Le gel tardif des informations est particulièrement utile lors de l'élaboration des spécifications puisqu'il permet d'incorporer tardivement les changements requis par les clients lors des phases de développement.

²⁷ AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur criticité. (Cf. Norme AFNOR NF X 60-510 de décembre 1986).

Ce dernier point met en évidence l'attention qui doit être apportée à l'élaboration des spécifications car des erreurs de captures ou des spécifications mal formulées conduiront inévitablement à des erreurs au cours de la conception.

3.1.1 « *Front-loading* »

Cette stratégie vise à détecter et à traiter au plus tôt les modifications émergentes. Elle conduit à une réduction des coûts et des délais de traitement d'une modification. Des auteurs comme Clark et al. [CLA91] ont également souligné cette opportunité en mettant en évidence la « Règle de Dix ». Issue de leurs observations des processus de conception, cette règle spécifie que le traitement d'une modification après le gel de la conception est dix fois plus onéreux que s'il avait été déclenché à une phase antérieure du cycle de vie du produit [NYB00].

Aujourd'hui, les méthodes de détection les plus performantes sont essentiellement basées sur des analyses de risques au cours de la conception. Le risque d'apparition d'une modification est principalement basé sur deux facteurs dont l'agrégation définit la criticité de la modification. Le premier facteur est lié à la probabilité d'apparition d'une modification et le second à l'impact de la modification. Un exemple de ce type d'analyse est décrit au travers de la méthode CPM (Cf. 4.4.3). Outre ce type de technique, il est important de noter que la détection de possibles modifications s'appuie également sur la connaissance que les concepteurs ont des systèmes et des modifications qui y ont été apportées par le passé. Ce dernier constat montre l'importance liée à la stratégie de capitalisation et de ré-utilisation des connaissances décrite dans la partie 3.1.4.

Un moyen de déclencher au plus tôt les modifications est de vérifier et de valider les concepts proposés lors des phases de développement en utilisant des outils tels que la maquette numérique ou les outils de simulation. En effet, à partir de la définition numérique du produit en 3D, il est possible de localiser des organes du produit les uns par rapport aux autres et donc de valider sa configuration en éliminant les problèmes d'interférences entre les composants [GOL00]. Parallèlement, la simulation numérique du comportement des différents organes (qu'ils soient matériels ou logiciels) permet de valider la qualité des fonctions qu'ils supportent. Une question ouverte consiste à déterminer quand les validations peuvent intervenir [OSC03].

Toutefois, la détection précoce des modifications potentielles n'implique pas nécessairement un traitement anticipé : en effet, les processus décisionnels et administratifs associés à la gestion des modifications induisent très souvent des retards puisqu'ils se situent à un niveau organisationnel plus élevé de l'entreprise.

3.1.2 *Efficience du processus de traitement*

Le but de cette stratégie est de s'assurer que les traitements entrepris sont absolument nécessaires afin de répondre aux attentes du client final tout en restant bénéfiques pour l'organisation. C'est donc la mesure du rapport conséquences/gains qui doit être prise en compte pour décider du démarrage du traitement d'une modification. Les conséquences recouvrent à la fois les impacts de la modification sur le produit et sur l'organisation. Elles sont généralement basées sur des estimations dont la granularité et la justesse garantiront la pertinence de la décision. Il en va de même pour les gains qui représentent les apports potentiels de la modification à la fois pour le produit, en termes d'évolution ou de qualité, mais aussi pour l'organisation, en termes de positionnement sur un marché vis à vis d'une compagnie cliente. Toute la difficulté de cette

évaluation réside donc dans le fait de confondre des éléments objectifs et facilement quantifiables avec des critères purement subjectifs.

3.1.3 Efficacité du processus de traitement

L'efficacité du traitement des modifications repose en grande partie sur l'usage optimal des ressources impliquées dans le traitement ainsi que sur la maîtrise des coûts et des temps de ce traitement.

Ainsi, le traitement d'une modification doit être considéré comme un projet à part entière et, par conséquent, être outillé. L'outillage doit permettre l'élaboration de plannings de traitement et des moyens de supervision pour les acteurs dont c'est la responsabilité. La supervision doit être effectuée en fonction des estimations (temps et coûts de réalisation) élaborées lors du déclenchement du traitement. Il convient donc de réaliser ces estimations avec justesse lors des phases de préparation.

De plus, la supervision doit s'effectuer de manière rigoureuse vis à vis des acteurs impliqués dans le processus afin de solliciter uniquement les compétences nécessaires et disponibles. Elle doit, en outre, offrir aux ressources sollicitées, une visibilité suffisante sur le processus afin que les acteurs puissent s'approprier l'objectif de la modification mais aussi visualiser le contexte de réalisation des tâches qui leur incombent.

3.1.4 Capitalisation et réutilisation des connaissances issues du traitement

Dans la pratique, le traitement efficace d'une modification est souvent le résultat d'une analogie avec une expérience passée. En effet, les estimations ainsi que les décisions reposent en partie sur les connaissances des acteurs impliqués dans le traitement. Une évaluation peut donc différer d'un acteur à l'autre puisque leurs connaissances ne sont pas obligatoirement partagées. Les objectifs de cette stratégie sont donc de formaliser et gérer les connaissances acquises par les acteurs lors du traitement d'une modification afin de :

- simplifier les traitements ultérieurs en faisant des recoupements avec les informations issues de traitements antérieurs lorsqu'une similarité est identifiable,
- de réintroduire ces connaissances dans le processus de développement afin de ne pas reproduire les mêmes causes de modification lors de la conception de nouveaux produits,

3.2 Besoins spécifiques au traitement des modifications relatives à un produit en phase de développement

Les besoins d'une organisation industrielle par rapport au traitement des modifications peuvent varier selon la phase du cycle de vie concerné. En effet, le traitement d'une demande de modification formulée lorsqu'un produit est en service ne soulève pas les mêmes enjeux que lorsqu'il est en phase de conception. Il convient donc de raffiner les stratégies génériques formulées dans la partie 3.1 en prenant en compte les besoins liés au traitement des demandes de modification pendant les phases de développement.

Il est toutefois difficile d'associer un des besoins spécifiques formulés à une et uniquement une des stratégies identifiées. Le plus souvent, la réponse apportée à un besoin spécifique participe à la mise en place de plusieurs stratégies à un niveau supérieur de l'organisation.

Besoins gé- nériques (Stratégies)	- Prévention de l'apparition des modifications, - « Frontloading » - Efficience du processus de traitement - Efficacité du processus de traitement - Capitalisation et réutilisation des connaissances issues du traitement
Besoins spéci- fiques aux phases de dé- veloppement	- Adapter les processus de traitement aux types de modifications à traiter - Faciliter l'accès aux informations lors du traitement d'une modification - Analyser l'impacts des modifications et les répercussions des solutions - Piloter et contrôler le processus de traitement - Supporter les prises de décisions - Mettre en place des dispositifs de collaboration dans le processus - Permettre la réutilisation des informations générées

Tableau 2 : Analyse des besoins liés aux traitements des modifications pour un produit en phase de développement.

Le Tableau 2 s'attache à décrire les besoins auxquels devraient répondre les travaux liés à l'optimisation du traitement des demandes de modifications relatives à des produits en cours de développement. C'est à dire que cette liste ne prend pas en compte les besoins auxquels une réponse est généralement apportée par l'intermédiaire des procédures courantes de gestion. A partir études et des entretiens menés chez le constructeur aéronautique européen AIRBUS, mais aussi chez le sous-traitant automobile SYLEA [RIV03], il devient possible de préciser ces besoins spécifiques.

3.2.1 Mise en œuvre des stratégies de gestion

Pour des raisons organisationnelles, un des premiers besoins soulignés est celui de mettre en place des stratégies de traitement permettant de répondre aux demandes de modifications. Aujourd'hui, il est fréquent de constater que, quel que soit le type de modification requis, le même processus de traitement est déclenché. Cette situation conduit à des écarts entre les solutions qui sont développées et les besoins formulés ou les attentes de l'émetteur. Par exemple, le besoin d'une compagnie aérienne désireuse d'inclure une nouvelle option sur sa flotte à moyen terme n'implique pas les mêmes enjeux qu'une évolution des réglementations aéronautiques qui appelle une correction urgente de systèmes en cours de développement.

3.2.2 Accès aux informations

Une partie importante des activités des concepteurs est consacrée à chercher, mettre en forme et analyser les informations requises pour la réalisation des tâches qui leur incombent. Il en va de même durant le processus de traitement des modifications. Ainsi, après analyse de leurs tâches, il est possible de constater que différentes natures de recherche sont entreprises (liste non-exhaustive) :

- recherche des informations relatives à l'état courant du système faisant l'objet d'une demande de modification, c'est à dire les informations relatives à sa configuration **avant** la demande de modification.
- recherche des raisons et des causes qui ont conduit à l'état courant de ce système, c'est à **dire l'historique de ce système**. Le traitement d'une demande de modification peut parfois s'apparenter à un cas de re-conception. Il devient alors indispensable de pouvoir comprendre les mécanismes qui ont pu conduire à un résultat aujourd'hui remis en cause.

- recherche des **liens existants** entre les diverses parties du système. Ceci est d'ailleurs particulièrement nécessaire lors de **l'analyse d'impacts** d'une modification ou des solutions qui sont développées afin de prévoir l'influence de la modification d'un paramètre d'un composant sur les paramètres d'autres composants du système.
- recherche des informations relatives aux activités réalisées par les acteurs en **amont** dans le processus de traitement.
- recherche des **analogies** avec des demandes de modifications déjà traitées pour un même système (ou un système similaire).
- recherche des informations relatives au produit mais stockées dans des **applications différentes** puisque répondant aux attentes d'autres métiers. Cette recherche permet notamment d'obtenir une vue d'ensemble du problème auquel il est nécessaire d'apporter une solution. Par exemple, s'il est possible d'obtenir les informations « techniques » relatives à un produit au travers des applications PDM et XAO, il devient beaucoup plus difficile pour un concepteur de prendre connaissance de l'ensemble des activités liées au développement de ce produit.

Ces constats conduisent à penser que les modèles de produits ou de systèmes aujourd'hui proposés et tels qu'ils sont implantés dans les applications informatiques ne contiennent que trop peu d'informations permettant de comprendre les évolutions de leurs composantes et les liens avec leur environnement. Ceci peut être partiellement dû aux vues du produit qu'entretiennent les différents métiers impliqués dans le cycle de vie du produit et qui les ont conduits à développer des modèles souvent trop spécifiques. Ainsi, malgré leurs existences, il reste difficile et onéreux de tisser et gérer des liens entre des informations et des modèles hétérogènes.

3.2.3 Analyse d'impacts des modifications et de répercussions des solutions

Lors du traitement d'une modification, deux types d'analyses d'impacts sont nécessaires. La première, l'analyse des impacts des modifications permet de déterminer le périmètre de la modification (c'est à dire les organes directement impliqués et par conséquent les acteurs ainsi que les processus associés) et d'éventuels risques de propagation de la modification hors du périmètre initial ; cette analyse détermine les impacts liés au problème défini dans la demande de modification. La seconde analyse d'impacts concerne les solutions qui sont proposées en réponse à une modification. L'impact des solutions doit être mesuré durant leur définition afin d'évaluer la criticité de leur future implantation ainsi que leurs répercussions sur les performances du produit concerné et sur le déroulement du programme.

Actuellement, les analyses d'impacts des modifications et des solutions reposent essentiellement sur l'expertise des acteurs bâtie au cours de leurs diverses expériences en conception. La qualité de l'analyse peut donc varier selon les connaissances mises en œuvre par les experts mais aussi selon leur capacité à pouvoir exprimer les contraintes et les dépendances qui unissent les différents ensembles d'un système.

Un des besoins récurrents est donc de mettre à disposition des acteurs du traitement des outils d'analyse d'impacts permettant de découvrir d'éventuelles propagations des modifications mais aussi d'évaluer les solutions techniques proposées selon leurs répercussions. Ce besoin est d'autant plus fort que les plannings des modifications peuvent être critiques.

3.2.4 Pilotage et contrôle du processus de gestion

Aujourd'hui, force est de constater que le processus de gestion des modifications reste fortement séquentiel et que les temps de traitement deviennent particulièrement longs lorsque la demande s'avère complexe. Cette lenteur peut être expliquée du fait que :

- les ressources impliquées dans ce processus ne sont pas exclusivement dédiées à la gestion des modifications,
- les points décisionnels constituent des «goulots d'étranglement» et les validations ou approbations peuvent prendre un temps considérable [LOC99] d'autant plus préjudiciables qu'ils sont difficiles à planifier (il peut parfois être urgent d'attendre),
- même si la séquentialité d'un processus présente de nombreux inconvénients du fait des boucles et des itérations qu'elle implique, elle n'altère pas pour autant la qualité des solutions produites mais peut ralentir le traitement.

Pour les mêmes raisons, il est possible de constater des écarts entre les objectifs de coûts et de temps fixés pour l'apport d'une solution et les performances effectivement constatées. Les responsables du traitement manquent donc singulièrement de visibilité sur le déroulement réel du processus de traitement d'une demande de modification.

3.2.5 Aide à la décision

Puisque le traitement des modifications est en partie basé sur un processus de coordination, certaines de ses phases sont jalonnées par des décisions. Pour qu'une décision soit exploitable et adaptée au problème posé, il convient de :

- préparer et analyser au préalable les informations sur lesquelles elle repose,
- la justifier afin qu'elle apparaisse comme fondée et que les acteurs puissent ainsi se l'approprier,
- la communiquer afin qu'elle soit connue de l'ensemble des acteurs,
- l'archiver avec son contexte puisqu'elle constitue une partie de l'historique de la solution.

Aujourd'hui, lors du traitement des modifications, les enjeux associés aux décisions à prendre ne sont que très peu abordés. La définition d'une méthode d'aide à la décision permettrait donc de diminuer le risque lié à une prise de décision mal adaptée.

3.2.6 Collaboration

L'ensemble des tâches accomplies dans le processus de traitement des modifications repose sur les informations produites par des acteurs en amont dans le traitement. Afin de diminuer les temps de traitement des modifications, mais aussi pour paralléliser au plus tôt les activités, les acteurs doivent pouvoir collaborer autour des informations relatives à la solution qu'ils développent afin de :

- débiter leurs activités,
- présenter des informations relatives au contexte ou des hypothèses formulées ou adoptées lors de la définition d'une solution,
- valider des choix à différents niveaux de maturité de la solution.

Ainsi les itérations dans le processus de traitement peuvent être sensiblement limitées et les choix technologiques figés au plus tôt.

3.2.7 Réutilisation des informations générées

Les raisonnements par analogies entre une demande de modification à traiter et celles préalablement traitées sont très fréquents lors des phases de conceptions. Ce type de raisonnement permet aux concepteurs de

- d'identifier les implications d'une demande de modification lorsque celle-ci partage des caractéristiques avec des demandes passées,
- réutiliser ou plutôt adapter des solutions existantes lorsque des similarités entre les demandes existent.

Mais, au-delà de l'identification d'analogies, la réutilisation d'informations issues du traitement peut également être relative à des alternatives de solutions développées puis ensuite abandonnées lors d'un précédent traitement. Dans ce cas, c'est la conservation des caractéristiques de l'alternative (et sa documentation) ainsi que son contexte d'élaboration qu'il est important de conserver en vue d'une future réutilisation.

3.3 Besoins spécifiques au traitement des modifications relatives au produit avion en cours de développement

Le développement d'un nouvel avion n'est pas en tous points comparable avec le développement d'autres artefacts industriels. La spécificité de certains besoins relatifs à la gestion des demandes de modifications visant des appareils en cours de développement doit donc ici être soulignée (Cf. Tableau 3).

Besoins généraux (Stratégies)	- Prévention de l'apparition des modifications, - « Frontloading » - Efficience du processus de traitement - Efficacité du processus de traitement - Capitalisation et réutilisation des connaissances issues du traitement
Besoins spécifiques aux phases de développement	- Adapter les processus de traitement aux types de modifications à traiter - Faciliter l'accès aux informations lors du traitement d'une modification - Analyser l'impact des modifications et les répercussions des solutions - Piloter et contrôler le processus de traitement - Supporter les prises de décisions - Mettre en place des dispositifs de collaboration dans le processus - Permettre la réutilisation des informations générées
Besoins spécifiques aux phases de développement d'un produit avion	- S'assurer de l'intégrité fonctionnelle du produit - Adapter le processus de traitement à la configuration de l'organisation - S'assurer de la traçabilité des informations générées au cours du traitement en vue de la certification du produit

Tableau 3 : Analyse des besoins liés aux traitements des modifications pour un avion en phase de développement

3.3.1 L'intégrité fonctionnelle du produit

Les composants d'un avion, qu'ils soient matériels ou logiciels, participent souvent à la réalisation de plusieurs fonctions. Lorsque la conception d'un de ces composants est

amenée à évoluer (par itérations ou modifications successives) alors l'intégrité des fonctions supportées par ce composant doit être maintenue. Par conséquent, lors de l'étude d'une demande de modification, les acteurs impliqués doivent vérifier que les fonctions pouvant être impactées ne sont pas altérées, car les performances et la sécurité même de l'avion peuvent être compromises.

3.3.2 L'adaptation du processus de traitement à la configuration de l'organisation

Dans le premier chapitre, la configuration des organisations aéronautiques, basée sur le concepts de distribution, a été mis en évidence. Au cours du développement d'un nouvel avion, les activités sont donc partagées entre les diverses entités de l'organisation, souvent géographiquement dispersées. Au cours de l'instruction d'une nouvelle demande de modification, les acteurs doivent donc tenter de :

- cantonner le traitement de la demande de modification à une seule entité de l'organisation,
- impliquer uniquement les ressources nécessaires de chaque entité pour le traitement d'une demande de modification.

3.3.3 La traçabilité des informations générées au cours du processus de traitement

La certification des produits aéronautiques est une des contraintes majeures de cette industrie et une assurance primordiale pour la sécurité des vols. Une partie des modifications doit être certifiée car elles peuvent affecter la future navigabilité de l'appareil en cours de développement. Cette certification est basée sur les études menées lors du traitement d'une nouvelle demande de modification. Il convient donc de conserver les informations générées au cours de ces études afin de prouver aux autorités que les modifications introduites n'altèrent en rien la navigabilité de l'appareil.

4 Etude des contributions existantes

A partir de la cartographie du besoin (Cf. Tableau 3) et de la revue des travaux disponibles dans la littérature, le but de ce chapitre est de détailler chacune des contributions existantes et de les positionner vis-à-vis des besoins exprimés ou constatés. Ces contributions comprennent les travaux qui sont directement ou indirectement liés au traitement et à la gestion des modifications.

4.1 Méthodologie d'étude

Afin de positionner les travaux relatifs à la gestion des modifications disponibles dans la littérature par rapport aux besoins résumés par le Tableau 3, trois thèmes de recherche découpés en 12 groupes de travaux ont été définis faisant eux même appels à plusieurs contributions individuelles.

Après l'étude des travaux disponibles dans la littérature, il est aujourd'hui possible de dégager trois grands thèmes participant à un traitement plus efficace des modifications. Le premier thème met en évidence les avantages liés à l'introduction de méthodes de conception robustes visant à limiter l'apparition des modifications. Ce thème participe donc directement aux stratégies de prévention et de « front-loading » identifiées dans la partie 3.1.

THEMES	GROUPES DE TRAVAUX	CONTRIBUTIONS
Maîtriser l'apparition des modifications par la mise en place de méthodes de conception robustes	Maîtrise de la qualité lors des phases de conception	Les plans d'expérience et la méthode Taguchi
		Les AMDEC
		La méthode QFD
	Intégration des contraintes liées au cycle de vie du produit dans les phases de conception	Des méthodes de conception spécifiques : « design for X »
		L'apport des moyens de simulation
	Maîtrise des variations et des caractéristiques et des attributs du produit lors de la conception	Les Design Structure Matrix (DSM)
		Les modeleurs paramétriques et variationnels en CFAO
Vers un traitement robuste des modifications	La gestion intégrée des modifications	
	Superviser le traitement des modifications	Des indicateurs pour le processus de traitement
		Planifier le traitement des modifications
L'analyse d'impacts des modifications et ses liens avec les modèles produits	STEP et la gestion des modifications	Représentation des modifications avec la méthode C-FAR
		Propagation des modifications avec la méthode C-FAR
	Mesurer les répercussions de la modification d'une spécification	
	Une méthode de prédiction des propagations des modifications	
	Un système à base de connaissances pour l'analyse d'impacts des modifications	
	L'évaluation des impacts des modifications sur le produit, sur le système de production et sur les performances de l'organisation	
	Un outils de satisfaction de contraintes pour la gestion des modifications : REDESIGNIT	
	Une gestion des modifications basée sur les paramètres du produit	

Tableau 4 : Positionnement des travaux

Le second thème regroupe les contributions qui établissent un cadre et/ou une méthode pour le processus global de traitement des modifications. Les travaux placés sous ce thème participent clairement aux stratégies d'efficacité et d'efficience définies dans la partie 3.1.

Enfin le troisième, met en évidence les enjeux liés à la modélisation du produit pour une gestion plus pertinente des demandes de modification et pour une analyse plus efficace des impacts possibles d'une modification. A l'inverse des autres thèmes, celui-ci porte plus sur l'apport d'améliorations locales au sein du processus de traitement. Ces améliorations permettent toutefois de répondre aux stratégies d'efficacité mais surtout de « front-loading ».

Les besoins auxquels répondent ces contributions seront détaillés au fur et à mesure de leurs descriptions dans les parties qui suivent.

4.2 Maîtriser l'apparition des modifications par la mise en place de méthodes de conception robustes

La meilleure méthode de traitement des demandes de modifications est d'éviter qu'elles apparaissent. Pour cela, il est nécessaire de limiter les variations et les remises en cause des résultats des méthodes de conception en introduisant des méthodes plus robustes.

4.2.1 La maîtrise de la qualité lors des phases de conception

L'introduction de méthodes qualité lors de la conception de nouveaux produits, participe à la mise en place d'une démarche de conception plus robuste. C'est-à-dire, vers des produits dont la conception est moins susceptible d'être remise en cause, de varier selon les évolutions des contraintes extérieures ou de conduire à une insatisfaction du client. Parmi les méthodes disponibles ne sont ici abordées que celles qui semblent le plus fréquemment utilisées en conception : les plans d'expériences et la méthode de Taguchi, le QFD et les AMDEC.

4.2.1.1 Les AMDEC « Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité »

Cette méthode d'analyse, initialement développée dans les années 50 par l'armée américaine afin d'évaluer la fiabilité de ses équipements (FMEA – Failure Modes and Effects Analysis), fait aujourd'hui partie des dispositifs normatifs.

L'AMDEC permet de déterminer les points faibles d'un système et d'y apporter les solutions nécessaires, de préciser les moyens de se prémunir contre certaines défaillances afin d'assurer la fiabilité de son fonctionnement futur (Fiabilité, disponibilité, sécurité, maintenabilité, etc.). Cette analyse n'est bien sûr pertinente que si les AMDEC sont remis à jour régulièrement.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Mise en place de la démarche ▪ Représentativité des acteurs ▪ Mise à jour des AMDEC	▪ Point de vue « Fiabilité » ▪ Intégration des aspects liés aux produits en service
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Possibilité de détecter les éléments sensibles aux variations en amont du projet et par rapport à sa future utilisation	

Tableau 5 : Les AMDEC

4.2.1.2 La méthode QFD « Quality Function Deployment »

Le QFD s'inscrit dans une réelle démarche de satisfaction des clients en faisant remonter leurs attentes ainsi que leurs besoins à l'ensemble des services de l'entreprise et donc aux fonctions impliquées dans le processus de conception [SHI94][AKA90].

La méthode QFD permet de cibler les paramètres nécessaires pour satisfaire le client, travailler sur la qualité perçue et détecter en amont dans le processus de conception les points pouvant être sensibles aux modifications [MAR00b]. La mise en évidence de ces paramètres s'effectue au travers du déploiement de matrices (« Maison de la qualité ») qui permettent :

- de définir les spécifications d'un produit (les « comment ») à partir des attentes des clients (les « quoi »),

- de comparer le produit avec ses concurrents,
- de faire apparaître la solution optimale à mettre en place par l'entreprise.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Mise en place de la démarche ▪ Synthèse des résultats	▪ Mise en évidence des besoins clients (internes et/ou externes) ▪ Préparation du processus de conception
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Possibilité de détecter les éléments sensibles aux variations en amont du projet.	

Tableau 6 : La méthode QFD

4.2.1.3 L'utilisation des plans d'expérience et la méthode de Taguchi

L'utilisation des plans d'expériences lors des phases de conception conduit à l'obtention de produits plus robustes. Malheureusement, cette approche expérimentale peut requérir la réalisation d'un nombre d'expériences important. La méthode Taguchi permet de réduire le nombre d'expériences à réaliser.

Globalement l'objectif de cette méthode est de réduire les variations des performances du produit, réduire l'effet des perturbations extérieures sans pour autant éliminer les causes.

Cette méthodologie se déroule en trois étapes principales :

- Comparaison des différents concepts afin de sélectionner le concept supérieur.
- Déterminer les valeurs optimales (cibles) des paramètres afin de rendre la solution insensible aux sources de variabilité (bruit).
- Déterminer les tolérances associées aux valeurs optimales.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Controverse entre la communauté des ingénieurs et celle des statisticiens ▪ Méthode d'optimisation en deux étapes ▪ Lenteur de la démarche	▪ Démarche structurée
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Identification des variables ▪ Identification du rapport Signal / Bruit	

Tableau 7 : La méthode Taguchi

4.2.2 L'intégration des contraintes liées au cycle de vie du produit dans les phases de conception

L'apparition de modifications liées aux itérations entre différentes phases du cycle de vie du produit ou entre deux métiers impliqués dans le processus de développement d'un nouveau produit peut être sensiblement limitée si ces contraintes sont formulées et introduites assez tôt dans le cycle de développement.

4.2.2.1 Des méthodes de conception spécifiques : « Design For X »

Depuis une dizaine d'années ont été introduites des méthodes permettant d'intégrer les contraintes liées à certaines phases du cycle de vie du produit dès les phases de conception. La plus connue d'entre elles, le DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) propose un guide conception du produit prenant en compte les caractéristiques

des solutions de fabrication qui ont été retenues pour sa future production. Ce type de méthode participe donc à la définition conjointe du produit et des procédés.

Ce type de méthode existe également pour d'autres phases du cycle de vie du produit comme par exemple pour son retrait en service (Design for Sustainability) d'où la généralisation du terme « Design for X ».

LIMITATIONS	APPORTS
▪ L'introduction de telles méthodes peut être « lourde » pour les concepteurs	▪ Identification des contraintes lors des phases de conception ▪ Diminution des itérations entre deux phases du cycle de vie du produit
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Partages de connaissances entre les acteurs de deux phases du cycle de vie du produit.	

Tableau 8 : « Design for X »

4.2.2.2 L'apport des moyens de simulation

La mise en oeuvre de moyens de simulation numérique au cours des phases de conception d'un nouveau produit permet de visualiser son comportement (ou celui d'un de ses systèmes) sur une échelle de temps réduite. Les possibilités offertes aujourd'hui par les performances informatiques ainsi que la qualité des modèles élaborés placent la simulation comme un outil incontournable du processus de développement (simulation par éléments finis, simulation cinématique, simulation logicielle, simulation d'activités humaines). Aujourd'hui, la simulation permet :

- la prédiction / visualisation du comportement d'un système seul ou par rapport à son environnement dans des conditions opérationnelles,
- la validation partielle de solutions techniques,
- l'optimisation partielle des solutions techniques,
- la négociation entre les acteurs de la conception.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Adéquation des modèles avec le produit	▪ Détection des problèmes et introduction au plus tôt des modifications dans le cycle de vie du produit ▪ Un outil de communication pour les acteurs du développement
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Existence d'un lien fort entre la simulation et la gestion des modifications	

Tableau 9 : Les moyens de simulation

4.2.3 Maîtriser les variations des caractéristiques et des attributs du produit lors de la conception

Les dépendances qui existent entre les attributs des composants peuvent véhiculer la variation d'une caractéristique d'un composant au travers de tout le système. Maîtriser les variations dans un système consiste donc à identifier les dépendances entre composants et à établir leurs comportements en cas de sollicitations.

4.2.3.1 L'exploitation des dépendances entre les composants d'un système par l'utilisation des « Design Structure Matrix » (DSM)

Les DSM sont des matrices contribuant à l'analyse des systèmes complexes. Elles fournissent des représentations claires des interactions / dépendances / interfaces entre les composants ainsi qu'une méthode de capture de ces informations. Elles peuvent également intervenir comme des outils de support dans la gestion de projet de conception fournissant des moyens de gestion des itérations et des dépendances cycliques entre activités. L'ordonnancement dynamique des projets de conception devient donc possible[MIT03].

Développées à l'origine au MIT, les premières DSM portaient sur la représentation des dépendances informationnelles entre les différentes tâches d'un processus [STE81]. Aujourd'hui, les DSM sont également appliquées à la représentation des interfaces entre les composants d'un système [MCC93] et aux interactions entre les équipes de conception d'une organisation [SOS93].

Les DSM mettent en évidence des dépendances entre composants au sein d'un système. Ces dépendances, quelles que soient leurs natures, véhiculent les variations de caractéristiques de certains composants, et les DSM permettent de tenir compte de ces contraintes au plus tôt dans le cycle de développement. La représentation matricielle fournit une visualisation plus aisée de ces contraintes tout en étant un support de communication pour les experts impliqués dans le processus de conception.

LIMITATIONS	APPORTS
- La méthode de capture des dépendances - La maintenances des dépendances en fonction des évolutions du système	Représentation des dépendances dans un système complexe
ELEMENTS MARQUANTS	
3 types de DSM : interactions, dépendances et interfaces - Visualisation des dépendances au sein même d'un système complexe (identification des variations possibles) - Outil d'assistance à la gestion de projets de conception	

Tableau 10 : Design Structure Matrix

4.2.3.2 Les modeleurs paramétriques et variationnels en CFAO

Les outils de CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur) comportent depuis les années 90 des modeleurs permettant des modifications aisées des géométries représentées. Deux technologies sont essentiellement utilisées, celle des modeleurs paramétriques et celles des modeleurs variationnels [TOL91][TOL92]. On peut noter que si ces systèmes rencontrent un grand succès du fait du degré d'expertise qu'ils intègrent au travers des contraintes qu'ils peuvent satisfaire, ils ne semblent pas encore à maturité pour être exploités dans les ensembles complexes rencontrés en aéronautique.

En effet, ces deux types de modeleurs s'accommodent parfois très mal du trop grand nombre de composants d'un système aéronautique et de la gestion des multiples dépendances qui les unissent. De plus ces deux types de modeleurs s'insèrent dans une chaîne de conception dans laquelle il est difficile pour eux d'échanger avec d'autres applications utilisées par exemple pour le calcul. Ainsi, la modification de la caractéristique d'un composant par un métier « calcul » ne peut pas être automatiquement répercutée sur la représentation géométrique du composant. De plus, par nature, ces types

de modeleurs s'adaptent très mal aux informations incomplètes qui sont pourtant fréquentes en conception.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ La gestion des dépendances entre « features » (nb de composants, nb de dépendances à gérer) ▪ Les échanges entre plusieurs applications ▪ Les capacités de réutilisation des modeleurs	▪ Etablissement de liens et de dépendances entre « features »
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ La possibilité d'établir des liens entre les caractéristiques de deux composants ▪ La possibilité de quantifier l'impact de la variation de la caractéristique d'un composant sur la caractéristique d'un autre composant voire la répercuter de manière automatique	

Tableau 11 : Modeleurs paramétriques et variationnels en CFAO

4.3 Vers un traitement robuste des modifications

Lorsque des modifications apparaissent malgré la mise en place de méthodes de prévention alors la stratégie à disposition de l'entreprise est d'optimiser ses processus de traitement des modifications.

4.3.1 La gestion intégrée des modifications

Lindemann et al. proposent une démarche plus globale en définissant le concept de gestion intégrée des modifications [LIN98]. Il s'articule autour d'une organisation des traitements, la mise en place d'une organisation et le support d'un système informatisé.

A Le processus intégré de traitement

La structure du processus de traitement se rapproche d'une procédure de résolution de problèmes telle que préconisée en ingénierie système (Cf. Figure 22). Elle se décompose en trois phases principales : la clarification du problème et de la tâche à réaliser, la recherche de solutions et enfin la sélection d'une solution parmi les alternatives proposées. Une quatrième phase est l'implantation proprement dite de la solution sélectionnée et son déploiement industriel. L'approche est très fortement basée sur un travail d'équipe et la collaboration entre acteurs, notamment pour l'évaluation de la solution. Les observations menées chez un constructeur automobile font ressortir que la sélection de la solution constitue généralement un niveau d'analyse et de décision suffisant. Chaque phase de ce processus doit être documentée afin de tracer les actions entreprises, conserver un historique du traitement (à des fins de réutilisation) et favoriser la collaboration entre acteurs. Les auteurs mettent également l'accent sur la nécessité de « grouper » les modifications ayant une même origine, c'est-à-dire de traiter avec la même instance de processus, l'ensemble des modifications issues du même fait technique ; on retrouve ici le traitement par lots si important dans les systèmes de production.

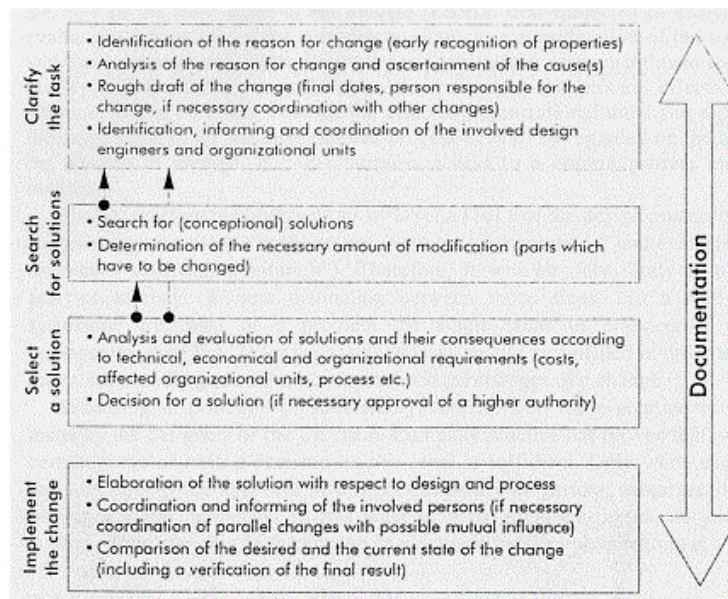


Figure 22 : Un processus intégré de traitement des modifications [LIN98]

B Une organisation spécifique au traitement des modifications

L'efficacité du processus repose également sur la mise en place d'une organisation basée sur deux concepts principaux :

- La collaboration entre des équipes « métiers » (aérodynamique, acoustique, etc.) et des équipes « produit » (cockpit, châssis, etc.). Ce type de collaboration, maintenant courant dans les processus de développement, permet d'éliminer les limitations d'un traitement séquentiel des modifications.
- Le choix d'un modérateur pour le pilotage du processus de traitement. Contrairement à un pilotage centralisé, la définition d'un modérateur vise à soutenir efficacement les échanges entre les acteurs du processus. Son rôle est de supporter les équipes impliquées dans la résolution d'un problème sans pour autant essayer d'apporter lui-même une solution technique.

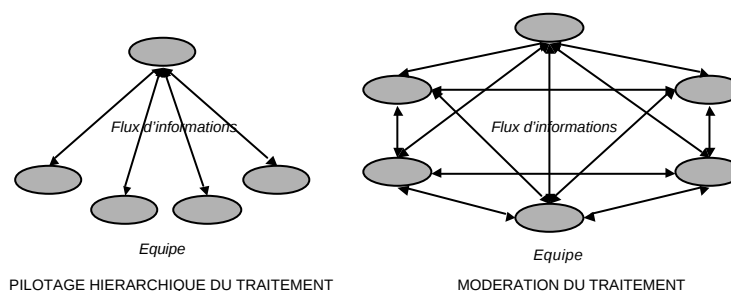


Figure 23 : Pilotage et Modération [LIN98]

C Un outil supportant le processus

L'outil proposé ne permet pas de contrôler le processus de traitement des modifications mais permet de formaliser et gérer la documentation qui est générée depuis la clarification du problème jusqu'à l'introduction d'une solution. Au-delà des limitations de l'outil, cette approche met en évidence trois aspects essentiels du traitement des modifications :

- le traitement d'une modification est similaire au processus de résolution de problèmes en conception,
- le traitement d'une modification est un processus collaboratif,
- le traitement d'une modification nécessite une configuration organisationnelle ainsi qu'une définition adaptée des rôles.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Généricité des concepts proposés ▪ Complexité de mise en œuvre de la démarche (implications organisationnelles)	▪ Construction d'un réseau pour le traitement des modifications ▪ Définition d'un modérateur dans le pilotage du traitement
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ La collaboration est au cœur du processus de traitement des modifications	

Tableau 12 : La gestion des intégrées des modifications

4.3.2 Superviser le traitement des modifications

Afin d'éviter d'éventuelles déviations du processus de traitement lors de l'instruction d'une modification, la mise en place de moyens de supervision adéquats d'avèrent nécessaires.

4.3.2.1 Des indicateurs pour le processus de traitement

La gestion intégrée des modifications permet d'accroître l'efficacité du traitement des modifications en considérant ce processus comme un projet de développement à part entière. Pourtant, ce processus ne semble pas être « outillé » pour la gestion de projet. Par conséquent, certains auteurs [RIV03] [HUA01] suggèrent la mise en place d'indicateurs selon les grandes étapes du processus de traitement afin de :

- superviser le processus de traitement,
- identifier les points bloquants ainsi que les voies d'amélioration possibles du processus,
- évaluer la mise en place des stratégies de traitement identifiées dans la partie 3.1.

Les indicateurs proposés par Rivière et al. dans [RIV03] sont exclusivement dédiés à contrôler le processus en fonction des stratégies suivantes : efficience, efficacité et « front-loading ». La Figure 24 montre les indicateurs proposés pour la première phase du processus de traitement qui correspond à la formalisation de la demande de modification ainsi qu'aux premières analyses d'impact de cette demande.

	EFFECTIVENESS	EFFICIENCY	"FRONT-LOADING "
STAGE 1	1. ESTIMATED EFFECTIVENESS	1. Throughput time	1. Product life cycle phase where the change is detected
	Estimated product performances efficiency	Lead time	
	Estimated process lead time	2. Scheduled lead time	
	Estimated product performances efficiency	3. Number of ECR related to the same problem	
	Actual product performances	4. Costs of waiting time until the decision to proceed is taken	
	Estimated cost efficiency	5. Urgency	
	Processing costs	6. Number of elements impacted by ECR	
	Estimated product performances efficiency	7. Planned effectivity of a solution	
	Estimated number of activities impacted		

Figure 24 : Exemple d'indicateurs associés au processus de traitement des modifications [RIV03]

Certains de ces indicateurs permettent de superviser le processus de traitement lorsque celui-ci se déroule et donc, si des actions correctives sont définies, de corriger d'éventuelles déviations par rapport aux objectifs fixés. D'autres permettent d'analyser à posteriori les performances d'un traitement et d'en retirer des connaissances pouvant être réutilisées pour le traitement de futures demandes de modifications.

La définition et la mise en place de ces indicateurs viennent consolider le rôle d'un acteur important du processus : le gestionnaire de configuration. En effet, la mise à disposition d'indicateurs lui permet réellement de superviser le processus dont il a la charge et d'y apporter des améliorations constantes. Pour que la supervision soit possible et efficace, des actions correctives doivent être associées aux indicateurs et à leurs tendances. Ainsi, un pilotage réactif du système devient possible si la mise à jour des indicateurs est régulière et s'ils reflètent la réalité. Celui-ci sera d'autant plus efficace si un outil permet de supporter la visualisation des indicateurs lors du traitement des modifications. Il est toutefois nécessaire de préciser que l'adaptation des indicateurs génériques proposés à des cas spécifiques peut être problématique.

LIMITATIONS	APPORTS
- Mécanismes d'adaptation des indicateurs en fonctions du contexte d'étude - Mécanismes de mises à jour et de maintenance des indicateurs	- Des indicateurs au service d'une supervision dynamique du processus de traitement - Des indicateurs pouvant contribuer à la mise en place d'une démarche de re-ingénierie du processus de traitement des modifications
ELEMENTS MARQUANTS	
- Définition d'indicateurs pour la supervision du processus de traitement - Elaboration d'indicateurs en fonction de stratégies de traitement - Identification des points bloquants dans le processus de traitement	

Tableau 13 : Des indicateurs pour le processus de traitement

4.3.2.2 Planifier le traitement des modifications

Eger et al. dans [EGE03] met en évidence le besoin de planifier l'exécution du processus de traitement des modifications. Au-delà de l'ordonnancement des activités de traitement, cette proposition souligne les liens forts qui existent entre les plannings de traitement et les plannings de développement. En effet, la mise en phase de ces deux types de plannings permet d'optimiser les solutions produites et de consolider leur phase d'implémentation.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Robustesse de la démarche ▪ Disponibilité et pérennité des informations relatives à la modélisation des processus de développement et à leurs plannings ▪ Maintenance des liens entre les informations relatives au produit et celles liées aux processus	▪ Démarche complète d'analyse d'impacts d'une modification ▪ Mise en évidence du besoin de planifier le traitement des modifications
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Existence d'un lien fort entre le processus de traitement des modifications et le processus de développement	

Tableau 14 : Planifier le traitement des modifications

La proposition se focalise donc sur l'analyse d'impacts des modifications et plus principalement sur la méthode CPM expliquée dans la partie 4.4.3. A partir des impacts prédits de la propagation d'une modification vers les composants d'un système, la proposition vise à en déduire les impacts sur les activités associées. Pour cela, il est supposé que les processus de développement sont modélisés à un niveau très fin et que les plannings d'exécution sont parfaitement connus. Lors du développement d'un système complexe, il se peut que ce type d'informations ne soit pas précisément connu.

4.4 L'analyse d'impacts des modifications et ses liens avec les modèles-produits

Dans la littérature scientifique relative à la gestion des modifications, un sujet émergent est l'analyse d'impacts des modifications. Ce thème est à la croisée des deux thèmes précédents : la mise en place d'un processus de traitement plus robuste limitant l'apparition de nouvelles modifications.

4.4.1 STEP et la gestion de modifications

La norme STEP²⁸ est une norme internationale proposée par l'ISO²⁹ sous la référence ISO 10303 et développée par le groupe ISO/TC184/SC4³⁰. Son but est la construction d'un standard permettant de traiter l'échange et la représentation de modèles de produits en couvrant tout leur cycle de vie. Cette norme s'appuie sur un modèle en trois couches présenté par [FER98] [CHA99][AGA02] :

- le modèle utilisateur qui décrit ce que voit l'utilisateur. C'est la couche applicative qui contient l'ensemble des vues nécessaires à l'utilisation de la norme dans le contexte d'une application donnée,
- le modèle informatique qui représente la structure de données. Il constitue la couche logique qui est une description formelle non ambiguë et non redondante des informations pouvant être utilisées pour la définition d'un produit,
- le modèle physique qui est la base de données. Il constitue la couche physique du produit qui est une représentation particulière du contenu destiné à la mise en œuvre dans l'application choisie.

Généralement, lorsque l'on s'intéresse à des produits et à des organisations complexes, les processus de traitement des modifications peuvent être partagés entre plu-

²⁸ STEP : STandards for Exchange of Product model data

²⁹ ISO : International Organization for Standardization

³⁰ <http://www.nist.gov/sc4/>

sieurs applications. Les modèles supportant leurs fonctionnalités sont hétérogènes et peu compatibles. Dans leurs travaux [PEN98], Peng et al. proposent des modèles de produits et de processus de traitement reposant sur la norme STEP et formalisés en langage EXPRESS afin de lever cette incompatibilité. S'ils ont le mérite d'établir des vecteurs de communication entre des applications hétérogènes, ils n'apportent pas d'améliorations des processus de traitement car ils ne constituent qu'une copie des procédures « papier » traditionnelles.

En revanche, la méthode C-FAR proposée par Cohen et al. semble beaucoup plus prometteuse [COH98]. Les objectifs de la méthodologie C-FAR (Change FAVORable Representation) sont de fournir une représentation efficace des modifications, de leurs propagations avec leurs évaluations qualitatives. Elle est également basée sur le formalisme EXPRESS.

A Représentation des modifications avec la méthode C-FAR

Selon la méthode C-FAR chaque entité est représentée comme un vecteur dont les dimensions représentent les attributs. Si l'on prend l'exemple d'une bouteille, ses attributs peuvent être sa taille et le matériau dont elle est composée. La bouteille sera donc représentée de la manière suivante (Cf. Figure 25) tandis que sa représentation textuelle sera la suivante BOUTEILLE [Taille de la bouteille, Matériau de la bouteille].

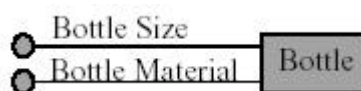


Figure 25 : L'entité BOUTEILLE formalisée à l'aide du langage EXPRESS-G [COH98]

Une modification de l'un ou l'autre des attributs conduira à l'établissement d'un nouveau vecteur pour l'entité bouteille. Ainsi, si la taille est modifiée, on obtient un « Vecteur de modification » qui est : BOUTEILLE [Δ , 0].

Une matrice est utilisée pour représenter les relations entre les attributs de différentes entités (Figure 26). Chaque lien entre entités est qualifié de « high », « medium » ou « low » selon que la modification d'un des attributs entraîne la modification de l'attribut qui lui est lié. Cette évaluation est faite par les experts lors de la conception des modèles.

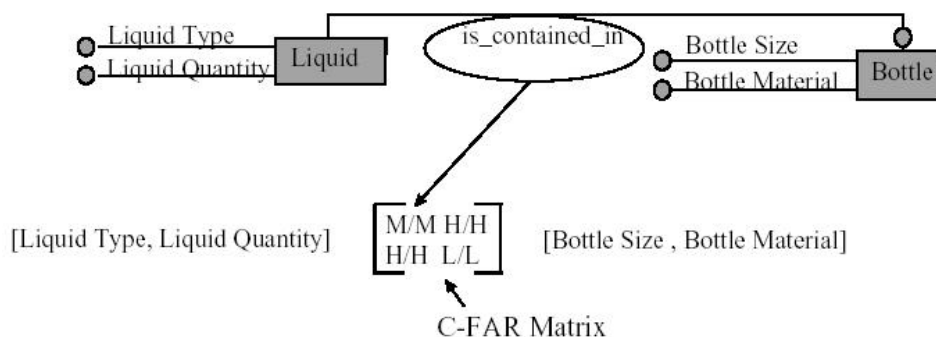


Figure 26 : Matrice C-FAR [COH98]

B La propagation des modifications avec la méthode C-FAR

L'identification et la qualification des propagations possibles entre deux entités est un élément important de la méthode C-FAR. Elle permet, à partir de la modification de l'attribut d'une entité « SOURCE », d'examiner les conséquences de la propagation sur une entité « CIBLE » tel que décrit sur la Figure 27. Par conséquent, lors d'une propagation de modification, les conséquences de la modification de l'attribut d'une entité sur les attributs d'une autre entité peuvent être quantifiées à l'aide la formule suivante [COH97]:

$$\Delta \text{ vecteur}(n) = \Delta \text{ vecteur}(n-1) * C(\text{Entité}_n-1, \text{Entité}_n-2)$$

où le vecteur de modification (dans ce cas la conséquence de la modification) de l'entité n est égal au vecteur de modification de l'entité précédente dans la chaîne de propagation (n-1) multiplié par la valeur du lien entre les deux entités.

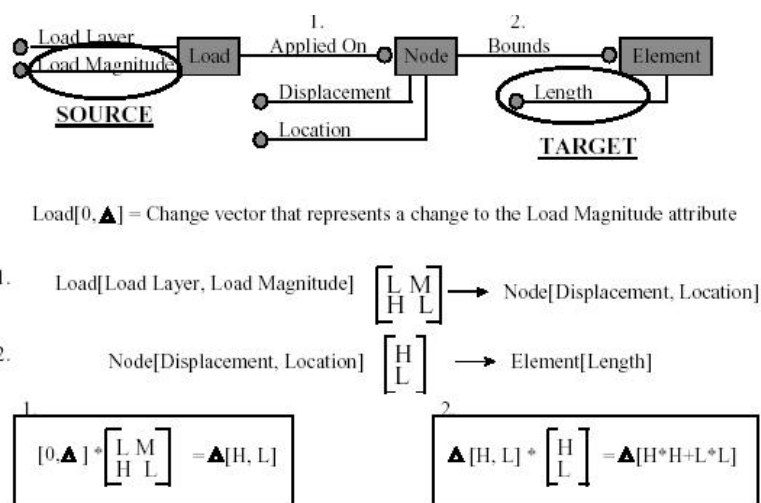


Figure 27 : Propagation des modifications avec la méthodologie C-FAR [COH98]

La méthode C-FAR a le mérite de mettre en évidence dans les modèles, les liens qui unissent les attributs des composants d'un système. Toutefois, il est possible de douter de la qualité des résultats obtenus lors des propagations de modifications. En effet, les liens qui unissent les attributs symbolisent l'influence de la modification d'un attribut sur un autre, qualifié de HIGH, MEDIUM ou LOW à laquelle on associe ensuite une valeur numérique. La pertinence de cette qualification peut varier d'un expert à l'autre. De plus la construction des modèles, des liens internes aux différents systèmes et des liens inter-systèmes, requiert un effort et une complexité sans certitude du retour sur investissement.

LIMITATIONS	APPORTS
- Qualification des influences (High, Medium, Low) - Effort de construction des modèles	Mise en évidence des liens entre attributs
ELEMENTS MARQUANTS	
- Evaluations qualitatives et quantitatives des propagations de modifications - Approche basée sur la norme STEP et sur le formalisme EXPRESS	

Tableau 15 : STEP et la gestion des modifications

4.4.2 Mesurer les répercussions de la modification d'une spécification

Lors des phases amont d'un projet de développement, les spécifications d'un produit, lorsqu'elles ne sont pas gelées, peuvent encore évoluer. Le but de la méthode proposée par Sutinen et al. dans [SUT02] est d'analyser qualitativement puis quantitativement les répercussions de la modification d'une spécification sur le produit et ses performances. Cette méthode prend également en compte l'effet inverse : l'impact de la modification du produit sur ses spécifications. Dans les deux cas la difficulté à lever réside principalement dans les couplages existants entre les spécifications d'un produit.

La méthode proposée, inspirée des outils de l'ingénierie système, s'appuie sur la modélisation suivante du produit (Cf. Figure 28). L'architecture des spécifications (« Requirements specification ») permet de décrire les contraintes et les objectifs auxquels devra répondre le produit final. La structure fonctionnelle (« Function structure ») décrit les fonctions que le produit final devra remplir. Ces deux structures sont mises en relation par des liens (appelés « tracelinks ») qui associent une spécification à une fonction. Chacune de ces fonctions est ensuite associée à un catalogue de solutions (« Solutions catalogues ») qui permet de décrire un ensemble de solutions alternatives pour chacune d'entre elles. Chacune de ces alternatives, est liée à un item de la structure conceptuelle (« Concept/Systems design ») qui correspond à une solution de conception à laquelle seront associés les composants de la structure physique (« part Structure »). A partir de cette modélisation du produit les modèles de propriétés associent les spécifications aux composants physiques et permettent l'analyse de la variation d'une spécification sur un composant final et vice-versa. Chaque modèle de propriété permet de réaliser une simulation différente des spécifications (Poids, éléments finis, etc.)

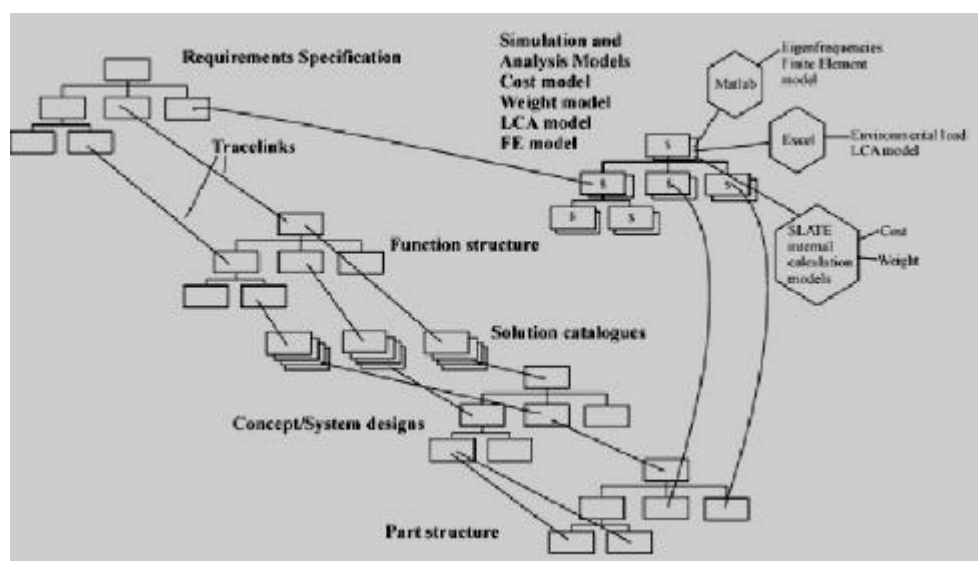


Figure 28 : L'architecture du modèle produit [SUT02]

Dans cette proposition, la détermination de l'impact des modifications repose entièrement sur les modèles d'analyse qui associent les spécifications aux composants physiques. La manipulation de ces modèles, comme par exemple les éléments finis, est classique lors des phases de développement. Mais, puisque la méthode est destinée aux phases amonts de la conception, il est possible de s'interroger sur la complétude de tels modèles à ce stade et donc sur la qualité des résultats obtenus. De plus, il n'existe aucun lien entre les fonctions, les modèles d'analyse et les éléments physiques,

ques, fonctionnalité qui serait particulièrement utile pour déterminer l'impact de la modification d'une fonction sur le produit final. Cette proposition met toutefois en évidence l'utilité de la prise en compte des modèles d'analyse lors de l'évaluation des impacts d'une modification ; c'est un point auquel nous attachons une importance cruciale.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Complexité et variété des modèles utilisés (gestion et maintenance) ▪ Complétude des modèles de simulation/analyse en phase de conception	▪ Utilisation des modèles de simulation et d'analyse
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Une approche issue de l'ingénierie système ▪ Analyse qualitative et quantitatives des répercussions d'une modification des spécifications sur les fonctions du produit ainsi que sur ses performances et propriétés physiques	

Tableau 16 : Répercussions de la modification des spécifications

4.4.3 Une méthode de prédiction des propagations des modifications

La méthode CPM (« Change Prediction Method ») est une approche probabiliste basée sur le concept de risque de propagation d'une modification. Elle est issue des travaux menés par l'Engineering Design Centre de l'université de Cambridge (GB) en collaboration avec GKN Westland Helicopters autour des problématiques liées à la personnalisation et à la re-conception de produits complexes [CLA01].

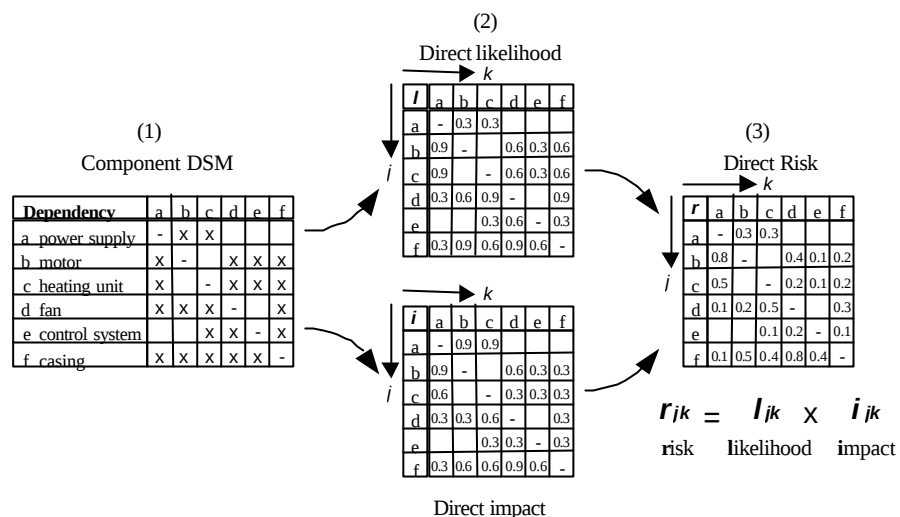
La méthode CPM repose sur le risque de propagation d'une modification au travers du lien qui associe deux composants. Pour définir ce risque, il est nécessaire d'établir un modèle du produit qui intègre à la fois les composants et leurs liens. Dans ces travaux, c'est la Design Structure Matrix (DSM)³¹ qui a été utilisée pour modéliser le produit. Une modélisation similaire est d'ailleurs recommandée par Martin et al. dans [MAR00] pour la construction de plates-formes de produits à forte diversité. A partir de ce modèle et pour prédire les modifications, il est associé à chacun de ces liens la probabilité qu'il véhicule une modification d'un composant à un autre ainsi que l'impact de cette propagation si elle a lieu (en terme de travail de re-conception par exemple).

La probabilité et l'impact sont normalement renseignés à partir des avis d'un groupe d'experts dont on établit ensuite la moyenne. Une amélioration notoire de la capture de ces facteurs est d'ailleurs proposée dans une nouvelle version de cette méthode basée sur les simulations de Monte-Carlo [JAR02]. Le risque de propagation d'une modification d'un composant A vers un composant B (noté $r_{a,b}$) est ensuite calculé de la manière suivante :

$$r_{a,b} = p_{a,b} * i_{a,b}$$

où $p_{a,b}$ est la probabilité de propagation et $i_{a,b}$ l'impact de cette propagation (Cf. Figure 29).

³¹ Pour plus d'informations sur la DSM, se reporter à la partie du site qui lui est dédié sur le site du Massachusetts Institute of Technology (MIT) : <http://www.dsmweb.org>.



1 – define product architecture 2 – define direct change characteristics 3 – define direct change risk

Figure 29 : Risque direct de propagation d'une modification entre deux composants [CLA01]

Le risque direct de propagation ne prend pas en compte le fait qu'une modification puisse impacter un composant par l'intermédiaire d'un autre composant. On parlera alors de propagation indirecte d'une modification. Pour les prendre en compte, il faut construire, à partir des modèles précédents, un arbre de propagation des modifications permettant d'identifier l'ensemble des chemins possibles entre deux composants (Cf. Figure 30).

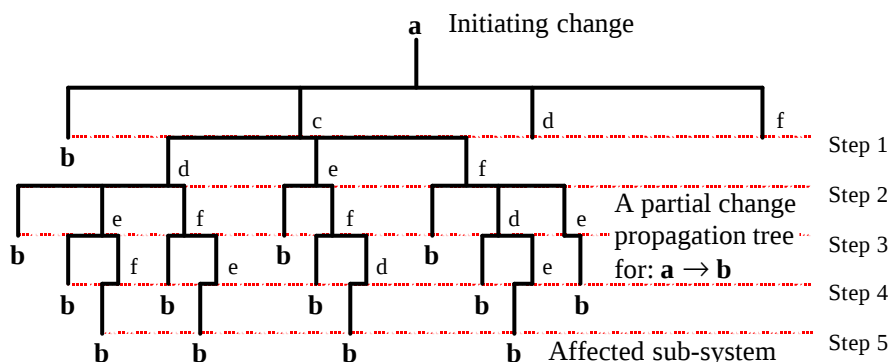


Figure 30 : Arbre de propagation des modifications [CLA01]

A partir de cet arbre de propagation, qui définit les propagations directes et indirectes, il est possible de calculer avec les algorithmes proposés, les probabilités, impacts et risques combinés. Ces résultats pourront être représentés sous la forme d'une matrice rendant compte de la robustesse du produit conçu vis-à-vis des modifications (Cf. Figure 31).

A partir de cette méthode, il est également possible de simuler la propagation d'une évolution en forçant la probabilité d'un lien à 1. Dans ce cas, la méthode ne contribue pas à l'analyse de la robustesse du produit aux modifications mais à la simulation d'une modification particulière.

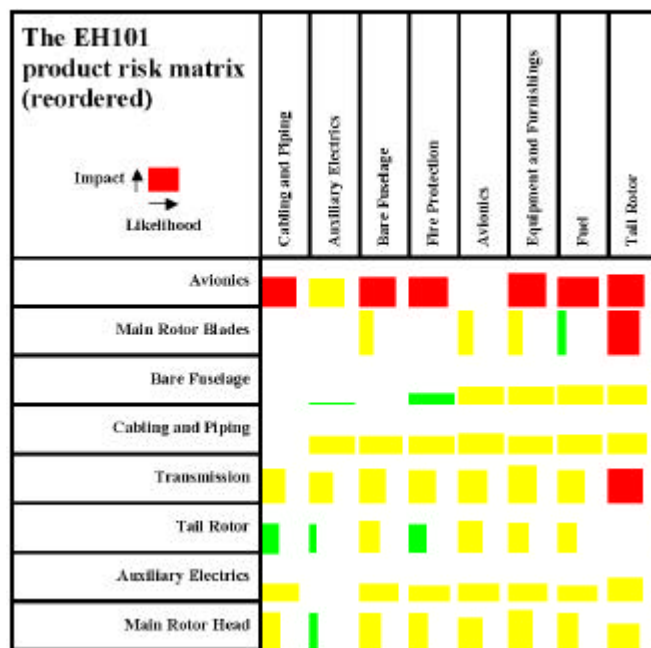


Figure 31 : Matrice représentant les risques de propagation des modifications [CLA01]

Si cette méthode permet de comprendre le comportement d'un système vis-à-vis des modifications dès la conception, elle présente toutefois quelques limitations qu'il est important de souligner [RIV02] :

- *Capture des probabilités et des impacts.* La détermination de ces facteurs peut varier d'un groupe d'experts à l'autre selon leurs connaissances du système et leur expérience dans le traitement des modifications. Cette variabilité des facteurs a une influence non négligeable sur la qualité des résultats obtenus malgré les apports apportés dans [JAR02].
- *Historique des modifications traitées.* L'analyse des modifications simulées pourrait être utilisée pour conforter les valeurs assignées à chacun des facteurs. Ce mécanisme n'est pourtant pas associé à la méthode.
- *Introduction de la méthode dans les processus de conception.* Le modèle produit représenté par la DSM est un modèle statique qui est défini par des experts alors que l'activité de conception requiert un modèle dynamique devant être remis à jour au fur et à mesure de l'évolution du produit dans son cycle de vie.
- *Liens entre composants.* Les liens entre composants ne sont pas typés alors qu'ils peuvent être différents (Cf. Chapitre 4). La caractérisation des liens et leur prise en compte permettraient de typer la propagation d'une modification.
- *Modifications simultanées.* Avec le modèle proposé, il n'est possible de simuler qu'une seule modification à la fois alors que la réalité industrielle impose de prendre en compte le traitement simultané de plusieurs modifications.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Méthode de capture des probabilités et des impacts ▪ Utilisation de l'historique des modifications traitées pour un système ▪ Prise en compte de modifications simultanées ▪ Un seul type de lien entre composants pris en compte	▪ Intégration possible de la méthode dans les processus de conception ▪ Prise en compte des propagations directes et indirectes ▪ Notion de risque de propagation directe et indirecte
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Approche d'analyse probabilistique des propagations de modifications ▪ Une démarche de conception robuste si la méthode est utilisée comme un moyen de simulation	

Tableau 17 : La prédiction des propagations des modifications

4.4.4 Un système à base de connaissances pour l'analyse d'impacts des modifications

Ma et al. dans [MA03] définissent une méthode pour quantifier et analyser les impacts des modifications en vue de faciliter les prises de décisions à certaines phases du processus de traitement. L'analyse ne se cantonne pas uniquement aux impacts sur le produit mais comprend également la quantification des impacts sur les projets via des facteurs opérationnels tels que les budgets, les délais de livraison ainsi que la disponibilité des ressources.

La méthode s'appuie sur trois éléments principaux :

- un modèle informationnel de l'activité de conception. Ce modèle implique quatre autres modèles permettant de représenter la configuration du produit, les processus, les ressources engagées ainsi que les relations qui les unissent.
- un moteur, générateur de projets qui permet de créer des projets de modification et ainsi de mettre en œuvre différents scénarii selon la demande de modification.
- un module d'analyse d'impacts permettant d'identifier les composants impactés par une modification et de déterminer les coûts et délais de traitement de la modification selon les scénarii proposés.

De manière simple, la solution proposée est basée sur la procédure illustrée par la Figure 32.

Cette méthode repose en grande partie sur la qualité des modèles proposés et sur la pertinence des liens entre les paramètres pris en compte. Malheureusement elle n'a pas encore été évaluée sur un cas d'étude concret. Malgré cela, quelques doutes relatifs à la qualité des résultats pouvant être obtenus et sur son éventuelle exploitation dans un contexte industriel peuvent être émis : en effet, les modèles de produits et de processus proposés ne sont pas toujours compatibles avec ceux disponibles dans l'industrie. Leurs constructions ont donc une implication sur le processus de conception et il convient de s'interroger sur l'activité des acteurs sensés les définir et les faire évoluer. De plus, à cause de la construction complexe de ces modèles et des difficultés qu'impose la capture des paramètres qui les enrichissent, la démarche peut être considérée comme lourde. Cette lourdeur semble d'ailleurs inhérente à la méthode quels que soient les différents cas de modifications se présentant puisqu'elle n'est pas adaptable à la criticité des modifications à traiter. Une alternative pourrait être d'enrichir la cons-

truction de ces paramètres en s'appuyant sur l'histoire du système et les modifications déjà traitées.

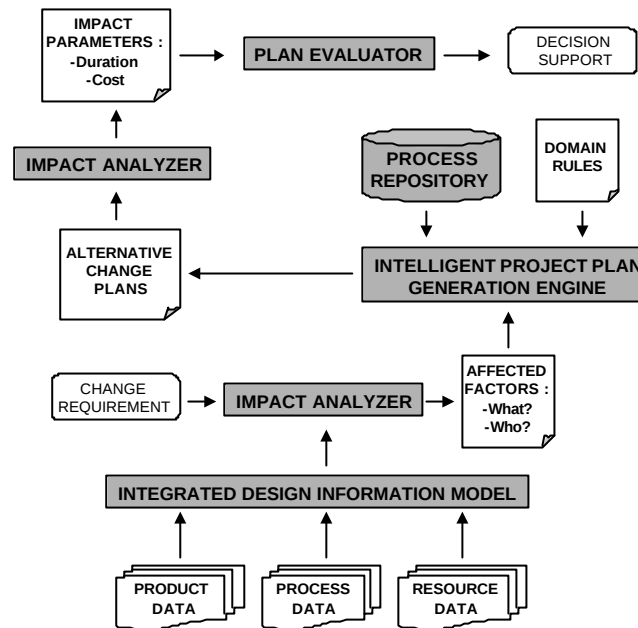


Figure 32 : Procédure de traitement d'une modification [MA03]

L'autre limitation essentielle que présente cette méthode est la définition des impacts sur les paramètres du projet en s'appuyant sur des scénarii déterminés. En effet, puisqu'il est possible de définir les impacts de la modification sur les composants puis sur les activités associées, une méthode est proposée ici afin d'estimer le temps requis pour la réalisation d'une activité lorsqu'elle est remise en cause. L'estimation intègre une courbe d'apprentissage et repose sur des données statistiques permettant de déterminer sa durée selon le nombre d'itérations réalisées par le même acteur. Mais cette approche semble ignorer que lorsqu'elle est remise en cause, une activité n'est pas obligatoirement réalisée par le même acteur et que les modes d'apprentissage peuvent être différents d'un acteur à un autre.

Malgré ces doutes sur les performances de la méthode proposée, Ma et al. ont le mérite de mettre en évidence que l'analyse d'impacts des modifications :

- ne doit pas se limiter aux impacts sur le produit mais aussi sur le projet,
- repose en partie sur la modélisation du produit,
- est liée à l'expérience des acteurs et à leurs modes d'apprentissage,
- doit fournir un ensemble d'informations correctes (représentatives de la réalité) et cohérentes en vue d'une prise de décision.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ lourdeur de la démarche ▪ Estimation des temps de réalisation des activités lors de la réalisation d'une activité ▪ Adéquation des modèles avec la réalité du projet	▪ Mise en oeuvre e scenarii pour le traitement d'une modification
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Analyse d'impacts d'une modification sur le produit mais aussi sur le processus de développement ▪ L'analyse est considérée comme un projet à part entière	

Tableau 18 : Un système à base de connaissances pour l'analyse d'impacts des modifications

4.4.5 L'évaluation des impacts des modifications sur le produit, sur le système de production et sur les performances de l'organisation

L'objectif de cette méthode proposée par Collaine dans [COL01] [COL00] est d'effectuer une évaluation quantitative de l'impact des évolutions techniques du produit sur les systèmes de production et sur les performances de l'entreprise en prenant en compte divers critères d'application. Le processus d'évaluation comporte quatre phases qui sont détaillées dans la suite.

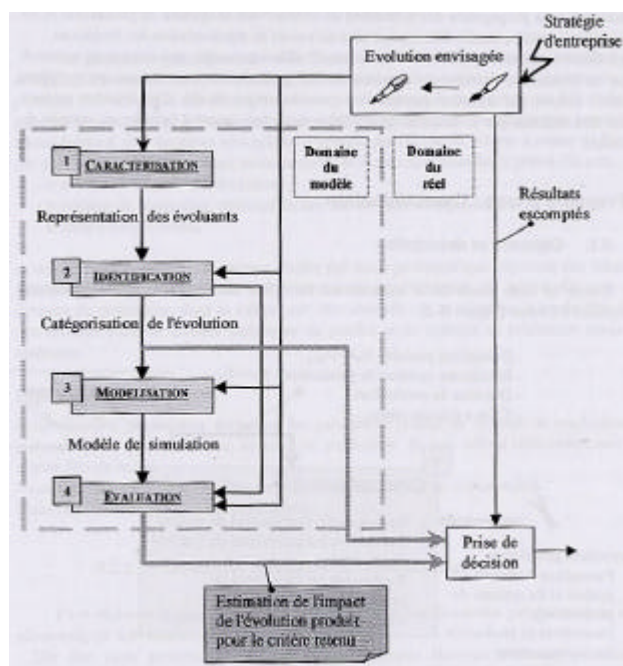


Figure 33 : Méthode d'évaluation de l'impact des évolutions [COL01]

A Phase de caractérisation

L'objectif de cette phase est de définir une représentation des éléments susceptibles d'évoluer. La représentation adoptée est une représentation par paramètres. Elle s'appuie sur une représentation générique constituée de paramètres représentatifs susceptibles d'évoluer. Ainsi, au cours de cette phase seront déterminés les paramètres suivants permettant de caractériser l'évolution :

- les *paramètres évoluants* du cas d'étude liés au produit, au système de production, ainsi qu'au critère retenu,

- les *paramètres de production* du cas d'étude dont la valeur peut être imposée par le client ou par la production mais non inclus dans les données techniques du produit et du système de production jusque là analysé,
- les *paramètres critère* du cas d'étude qui sont spécifiques au critère étudié.

B Phase d'identification

Au cours de cette phase, les types d'évolutions à prendre en compte lorsqu'un cas se produit sont identifiés. Ainsi, la méthode distingue deux types d'évolution du produit : les modifications majeures et mineures. Tandis que pour les systèmes de production, les évolutions peuvent relever de l'adaptabilité opérationnelle ou stratégique. Par conséquent, l'identification d'un cas qui ne correspond pas à ces différentes catégories conduit à son élimination car il ne pourra pas être géré avec la méthode proposée. Cette opération est réalisée à partir de l'élaboration de matrices des paramètres évoluant et des paramètres critères qui seront ensuite confrontées à des matrices de références associées à chaque type de modification.

C Phase de modélisation

Les modèles décrits par les matrices précédentes ne permettent pas d'identifier l'existence de liens d'évolution entre paramètres évoluant ainsi qu'entre les paramètres évoluant et les paramètres critères. De plus, ces modèles statiques ne permettent pas de représenter la dynamique des modifications et ne permettent pas à fortiori, de déduire les impacts des évolutions pour un critère donné. Le but de cette phase est donc de construire un modèle, basé sur les réseaux de Petri Interprétés Colorés et Temporisés, permettant de :

- représenter la propagation des évolutions,
- réaliser une simulation destinée à quantifier l'impact d'une évolution sur un critère donné.

D Phase d'évaluation

La phase d'évaluation apporte une réponse au problème initialement posé. Par conséquent à l'issue de cette phase, il est possible d'obtenir une évaluation de l'impact d'une évolution pour le critère choisi, et parallèlement, d'avoir un modèle de propagation de l'évolution. C'est donc une simulation du modèle construit précédemment, pour lequel un marquage initial a été mis en place et une séquence de tirs définie, qui est réalisée. A l'issue de la simulation, les résultats suivants sont obtenus :

- un modèle lisible : les paramètres et les liens d'évolution sont facilement identifiables à travers le choix d'affectation des places et des transitions,
- la dynamique de propagation est portée en grande partie par la couleur des jetons affectée aux poids,
- la représentation de la dynamique des évolutions est portée par le graphe de marquage du réseau,
- les données d'évolution du critère sont renseignées par les temporisations affectées au niveau des transitions concernées.

La méthode, illustrée sur un cas de la société TIMKEN³², met en évidence un aspect particulier de l'analyse d'impact des modifications : les répercussions des évolutions sur les systèmes de production et les performances de l'entreprise. Toutefois, pour ces

³² Le cas d'étude de la société TIMKEN présenté dans ces travaux est issu de son site de COLMAR qui conçoit et fabrique des roulements à rouleaux coniques.

dernières, seules des performances de types délais sont prises en compte alors que d'autres facteurs comme les coûts des répercussions semblent tout aussi importants. D'autres part, la méthode n'aborde pas la propagation des modifications entre éléments distincts du produit, point extrêmement important pour les produits complexes.

<i>LIMITATIONS</i>	<i>APPORTS</i>
▪ Limitation au facteur délais ▪	▪ Adaptation aux cas de re-conception ▪ Définition de paramètres évolutifs
<i>ELEMENTS MARQUANTS</i>	
▪ Analyse d'impacts des modifications sur le produit, le système de production et les performances de l'entreprise ▪ Utilisation des réseaux de pétri colorisés pour l'analyse d'impacts	

Tableau 19 : L'évaluation des impacts des modifications sur le produit, sur le système de production et sur les performances de l'organisation

4.4.6 Un outil de satisfaction de contraintes pour la gestion des modifications : REDESIGNIT

REDESIGNIT est une méthode destinée à évaluer les propositions de modifications lors des phases de re-conception. La méthode, proposée par Ollinger et al. dans [OLL01], sert à mesurer l'influence d'une modification sur l'objectif de la re-conception tout en mettant en évidence les éventuels effets indésirables de l'évolution. Toutefois, REDESIGNIT semble plus approprié à l'étude de cas d'optimisation d'un système plutôt que pour le traitement des modifications usuelles en conception.

L'outil repose sur la définition d'un modèle du système prenant la forme d'un diagramme de causalité (Cf. Figure 34) ainsi que sur des algorithmes permettant de propager les modifications pour atteindre l'objectif de la re-conception tout en respectant les contraintes du système.

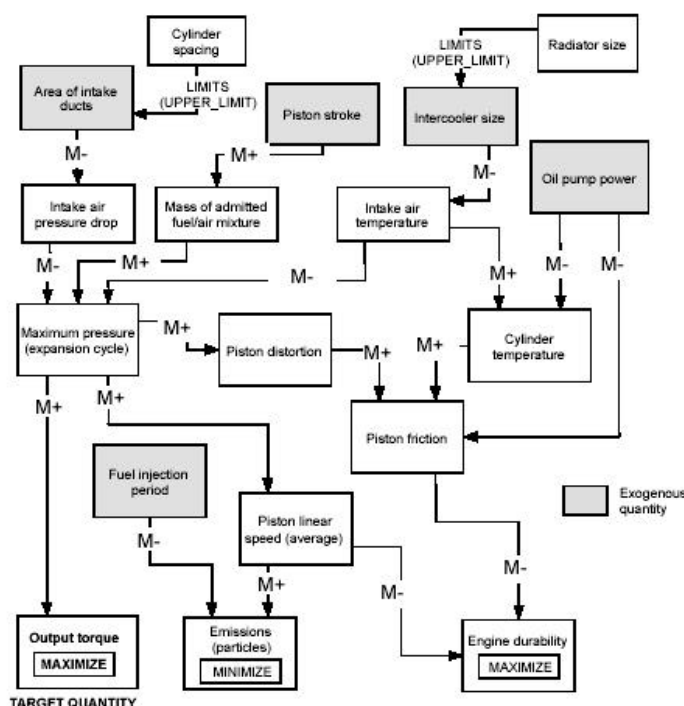


Figure 34 : Représentation d'un moteur diesel [OLL01]

Ce modèle, prenant la forme d'un graphe, intègre trois concepts fondamentaux. Tout d'abord les *quantités*, c'est à dire les propriétés physiques du produit ainsi que ses caractéristiques. Si la quantité est exogène alors sa magnitude peut être modifiée directement par le concepteur. Sinon, sa modification résulte des liens causaux avec d'autres quantités qui peuvent avoir changé. Les magnitudes sont utilisées pour que le programme puisse additionner et multiplier les modifications lorsqu'elles se propagent dans le graphe ainsi que pour comparer les quantités sans avoir à développer un modèle numérique détaillé du système. Elles sont partitionnées en trois types selon les seuils suivants :

- low (de l'ordre de 10^{-1} ou moins) ;
- zero (de l'ordre de 10^0) ;
- et high (de l'ordre de 10^1 ou plus).

Une modification de la magnitude d'une quantité est caractérisée par une influence (une diminution ou une augmentation) ainsi qu'une différence absolue qui est spécifiée par l'ordre qualitatif de magnitude.

Les *contraintes* qui sont appliquées à chacune de ces quantités permettent d'exprimer la spécification associée à une quantité et permettront d'évaluer la criticité de la modification sur la quantité. Il existe quatre types de contraintes :

- FIXED : une seule valeur est acceptable pour la quantité. Chaque déviation de cette valeur constitue une violation de la contrainte.
- MAXIMIZE : il est préférable que la valeur de la contrainte soit maximale.
- MINIMIZE : il est préférable que la valeur de la contrainte soit minimale.
- RANGE : Il y'a une fourchette acceptable de valeurs pour la contrainte.

Enfin, les relations de causalité permettent d'identifier la manière dont la modification d'une quantité influe sur une autre quantité (M^+ correspond à une augmentation tandis que M^- correspond à une diminution). Il existe aussi des relations qualifiées de LIMITS qui décrivent les situations dans lesquels la magnitude d'une quantité impose une limite (supérieure ou inférieure) à une autre quantité.

A partir du modèle, et après avoir établi les règles de propagation (l'effet que produit la modification d'une quantité – à la hausse ou à la baisse - sur une autre quantité), il devient possible de calculer les magnitudes des modifications qui peuvent ensuite être évaluées par rapport aux contraintes. L'ensemble de ces résultats est ensuite utilisé pour déterminer des plans de re-conception prenant en compte l'influence sur l'objectif visé ainsi que ses effets indésirables.

La méthode REDESIGNIT s'avère être particulièrement adaptée au cas de re-conception lorsque l'ensemble des paramètres et des liens qui les unissent ainsi que les propriétés qui régissent le comportement d'un système sont parfaitement connus. La qualité de la simulation et des optimisations dépend en grande partie de la rigueur avec laquelle la modélisation des propriétés est effectuée. Il est tout de même possible de douter de l'applicabilité de la méthode REDESIGNIT pour traiter l'ensemble des modifications d'un produit complexe en cours de développement du fait de l'ensemble des comportements à modéliser.

LIMITATIONS	APPORTS
- Granularité des modèles - Modélisation des comportements d'un système	- Définition de liens de causalité entre caractéristiques/attributs/performances du produit - Intégration des contraintes du système
ELEMENTS MARQUANTS	
- Méthode adaptée aux cas de re-conception en vue d'une optimisation - Approche d'analyse par satisfaction de contraintes	

Tableau 20 : la méthode REDESIGNIT

4.4.7 Une gestion des modifications basée sur les paramètres du produit

Lors du développement d'un produit complexe en ingénierie concourante, il est possible que plusieurs entités de l'entreprise étendue soient affectées par la propagation d'une modification (Cf. Figure 35). Afin de détecter ces propagations potentielles, Rouibah et al. proposent une approche basée sur les paramètres et les liens qui unissent l'organisation et le produit [ROU03a] [ROU03b]. Cette approche permet également de supporter la collaboration entre acteurs et favorise donc la communication des différentes parties impliquées dans la phase de développement.

Cette approche, développée dans le cadre du projet SIMNET³³, repose sur des paramètres qui sont les composants élémentaires des variables d'ingénierie fixées collaborativement par les acteurs de la conception (par exemple des forces, des dimensions ou des mouvements). A chacun de ces paramètres est associé une valeur, un niveau de maturité ainsi qu'un statut. Le niveau de maturité reflète la confiance qu'accorde l'équipe de conception à la valeur d'un paramètre tandis que le statut reflète l'état dans le cycle de vie du paramètre (In work, release, etc.). A partir de la définition des liens entre paramètres, il devient possible de construire un réseau de tel que celui représenté Figure 36.

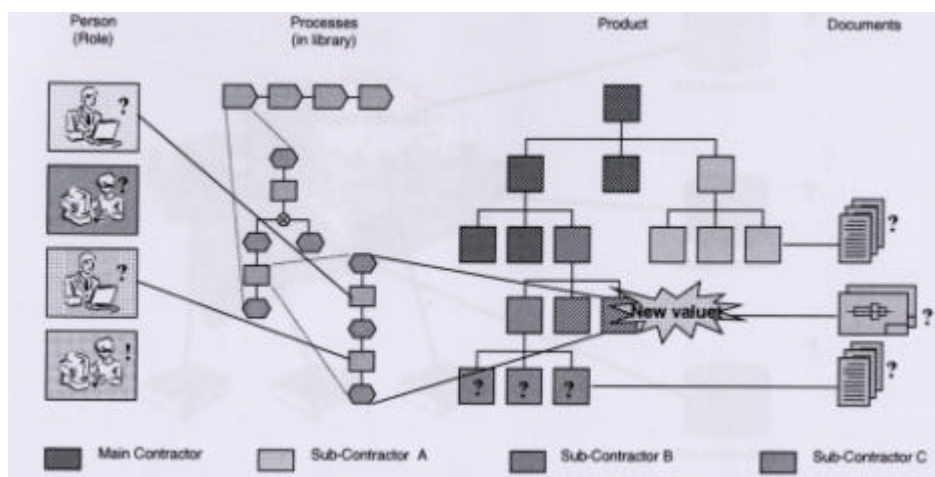


Figure 35 : la propagation des modifications [ROU03]

La Figure 36 montre que le réseau peut être représenté sous la forme d'une matrice dans laquelle la valeur associée à chaque cas unissant deux paramètres symbolise le type de liens qui les unit. Ainsi 1 symbolise un lien direct tandis que 2 symbolise un lien indirect du premier ordre et 3 un lien indirect de second ordre.

³³ SIMNET : workflow management for SIMultaneous engineering NETwork. Projet financé par la commission européenne sous la référence EP26780. Pour plus d'informations : <http://www.imw.tu-clausthal.de/simnet/Welcome.html>.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A: Maximum axle diameter (max_axle_diam)		1	1	1					
B: Maximum static axle load (max-axle-load)									
C: Bearing distance (bear_dist)				1					
D: Track gauge (track_gauge)									
E: Distance between wheel axle and motor axle (wheel_motor_dist)	1	2	2	2		1	1	1	1
F: Gear transmission ratio (gear_transm_ratio)	2	3	3	3	1		1	2	2
G: Worm wheel diameter (wheel_diameter_worm)									
H: Clearance to upper surface of the rail (clearance-to-rail)									
I: Number of gear steps (gear_steps)	1	2	2	2		1	1	1	

Figure 36 : Exemple de réseau de paramètres d'un boggie de wagon [ROU03]

Si ce réseau constitue le cœur de la méthode proposée, pour que celle-ci soit efficace, les étapes suivantes doivent être suivies lors du démarrage d'un nouveau projet de développement :

1. *Définition des paramètres.* Au début de chaque projet, le donneur d'ordre, ses fournisseurs et partenaires définissent collaborativement les paramètres du système et notamment ceux en interfaces qui devront supporter leur coopération.
2. *Association des acteurs impliqués dans le développement aux paramètres identifiés.*
3. *Etablissement des paramètres prédéfinis.* La valeur de certains paramètres peut être définie lors de l'élaboration des spécifications.
4. *Association des paramètres aux composants du produit.*
5. *Assignment d'une valeur aux paramètres restants.*
6. *Approbation des paramètres.*

La procédure de traitement d'une modification d'un paramètre est la suivante :

1. *Identification du paramètre devant être changé et notification.* Chaque demande de modification d'un paramètre est identifiée et décrite par l'acteur qui sollicite son évolution. Cette demande est ensuite notifiée à l'ensemble des acteurs associés à ce paramètre par un workflow. Une liste de discussion, associée à cette demande, est également créée.
2. *Discussion de la demande.* Au cours de cette phase, la demande est évaluée et approuvée. C'est donc le statut de la demande qui évolue et lorsqu'elle est acceptée, l'ensemble des composants et des personnes affectées par cette demande est identifié.
3. *Evaluation de l'impact de la modification.* Le but de cette phase est d'identifier les propagations potentielles de la demande de modification vers d'autres paramètres. L'algorithme identifie, dans un premier temps, les relations directes entre paramètres puis les relations indirectes. Les résultats sont ensuite débattus dans la liste de discussion afin de décider s'il est nécessaire de conduire des investigations selon d'autres paramètres à partir de la modification du paramètre initial.
4. *Approbation de la modification.* Les nouvelles valeurs des paramètres doivent être validées avant que la modification soit réellement introduite.

5. *Enregistrement du traitement de la modification.* Le but de cette phase est de garder un historique de traitement pouvant servir de nouvelle référence pour le traitement de la modification d'un paramètre similaire dans le futur.

La méthode proposée met en avant le besoin actuel de gérer une modification collaborativement lors du développement d'un produit complexe. De plus, l'approche par paramètres, permet d'obtenir une modélisation du système avec une granularité pouvant être très fine. Si cette granularité peut être considérée comme un avantage, il est possible de s'interroger sur l'applicabilité de la méthode à des produits complexes. Toutefois, avec cette méthode, l'analyse d'impacts n'est pas prescriptive mais montre l'existence possible d'une propagation aux acteurs (sans pour autant la quantifier) qui doivent ensuite délibérer de l'intérêt d'une étude plus détaillée. Cette approche peut donc conduire à l'obtention d'outils de gestion ouverts constituant un réel apport aux acteurs de la conception.

LIMITATIONS	APPORTS
▪ Complexité de la mise en œuvre ▪ Granularité des paramètres ▪ Mise à jour des modèles	▪ Prise en compte des aspects collaboratifs ▪ Définition de paramètres comme variables de modélisation
ELEMENTS MARQUANTS	
▪ Méthode supportant le traitement d'une modification au sein de l'Entreprise Etendue (traitement transverse et collaboratif) ▪ Analyse d'impacts d'une modification sur le produit pouvant être très fine	

Tableau 21 : Une approche du traitement basé sur les paramètres

4.5 Positionnement des contributions existantes

A partir de la cartographie des besoins industriels relatifs au traitement des modifications lors du développement d'un nouvel avion (partie 3) et après étude des travaux existants dans ce domaines, il devient possible de positionner les différentes contributions par rapport aux exigences opérationnelles (Tableau 22).

Cet effort de positionnement ne prend pas en compte les apports de chaque contribution et vise à mettre en valeur les besoins auxquels elles peuvent apporter un réponse même partielle.

Ainsi, il apparaît que les stratégies 4 et 5 (efficience du processus de traitement et réutilisation des connaissances générées lors du traitement d'une modification) ne sont que très peu abordées.

De la même manière, les besoins relatifs à l'analyse d'impacts sont aujourd'hui largement abordés selon des angles particuliers et des degrés de pertinence divers mais surtout pour limiter les propagations de modification et supporter les décisions. Toutefois, des besoins tels que l'adaptation des processus de traitement et leur pilotage ne font pas aujourd'hui l'objet d'efforts d'optimisation suffisants.

Par conséquent, ce positionnement permet d'identifier les besoins prioritaires auxquels la proposition détaillée dans le chapitre 4 et illustrée dans le chapitre 5 apportera des réponses.

THEMES	GROUPES DE TRAVAUX	CONTRIBUTIONS	STRATEGIES	BESOINS
Maîtriser l'apparition des modifications par la mise en place de méthodes de conception robustes	Maîtrise de la qualité lors des phases de conception	Les plans d'expérience et la méthode Taguchi	1	
		Les AMDEC	1	
		La méthode QFD	1	
	Intégration des contraintes liées au cycle de vie du produit dans les phases de conception	Des méthodes de conception spécifiques : « Design for X »	1	
		L'apport des moyens de simulation	1	
	Maîtrise des variations et des caractéristiques et des attributs du produit lors de la conception	Les Design Structure Matrix (DSM)	1	
		Les modeleurs paramétriques et variationnels en CFAO	1	
Vers un traitement robuste des modifications	La gestion intégrée des modifications		3, 4	B, F
	Superviser le traitement des modifications	Des indicateurs pour le processus de traitement	4	D, E
		Planifier le traitement des modifications	2, 3, 4	D
L'analyse d'impacts des modifications et ses liens avec les modèles produits	STEP et la gestion des modifications	Représentation des modifications avec la méthode C-FAR	1	
		Propagation des modifications avec la méthode C-FAR	2, 4	C, E
	Mesurer les répercussions de la modification d'une spécification		1, 2, 4	C, E, H
	Une méthode de prédiction des propagations des modifications		1, 2, 4, 5	C, E, G
	Un système à base de connaissances pour l'analyse d'impacts des modifications		1, 2, 4, 5	C, D, E, G
	L'évaluation des impacts des modifications sur le produit, sur le système de production et sur les performances de l'organisation		1, 2, 4	C, E
	Un outils de satisfaction de contraintes pour la gestion des modifications : REDESIGNIT		1, 2, 4	C, E
	Une gestion des modifications basée sur les paramètres du produit		1, 2, 4	C, E, F, I
Stratégies : 1- Prévention de l'apparition des modifications 2- « Front-Loading » 3- Efficience du processus 4- Efficacité du processus 5- Capitalisation et réutilisation des connaissances issues du traitement				
Besoins relatifs aux traitements des modifications pour un avion en phase de développement : 1 Adapter le processus de traitement aux modifications à traiter 2 Faciliter l'accès aux informations lors du traitement d'une modification 3 Analyser l'impact des modifications et les répercussions des solutions 4 Piloter et contrôler le processus de traitement 5 Supporter les prises de décisions 6 Mettre en place des dispositifs de collaboration dans le processus 7 Permettre la réutilisation des informations générées 8 S'assurer de l'intégrité fonctionnelle du produit 9 Adapter le processus de traitement à la configuration de l'organisation 10 S'assurer de la traçabilité des informations générées au cours du traitement en vue de la certification du produit				

Tableau 22 : Positionnement des contributions par rapport aux stratégies et aux besoins

5 Conclusions

A partir de l'analyse des contributions scientifiques sur l'optimisation des processus de traitement des modifications, il est désormais possible de mettre en évidence les évolutions souhaitables du processus de gestion des modifications.

Tout d'abord, il est maintenant clairement reconnu que le processus de gestion des modifications est un processus de résolution de problèmes en de nombreux points simi-

laire au processus de conception. A ce titre, chaque traitement de modification doit être géré comme un projet de développement dont l'ampleur varie selon la criticité de la demande émise.

Par conséquent, un processus de traitement doit être piloté et supervisé par le gestionnaire de configuration. Cette exigence implique deux conséquences : tout d'abord, que le rôle de gestionnaire de configuration soit clairement défini dans l'organisation, puis que des moyens techniques ainsi que des ressources lui soient dédiées. Comme nous l'avons vu, la mise à disposition de ressources et la disponibilité des acteurs sont étroitement liées à l'organisation de l'entreprise. Une organisation cloisonnée s'oppose à la mise en place d'un processus de traitement transversal et efficace des modifications.

Pour le pilotage et la supervision du déroulement des processus de traitement en cours, le gestionnaire de configuration doit mettre en œuvre des stratégies dont les bénéfices sont clairement établis. Elles visent à apporter une solution technique en conformité avec les attentes et les exigences de l'émetteur d'une demande de modification tout en limitant les impacts négatifs sur le produit et les projets de développement ; mais l'impact sur la compétitivité de l'entreprise doit pouvoir être évalué. C'est également pour ces raisons, mais aussi selon la criticité de la modification, qu'un niveau élevé de risque peut être associé aux décisions devant être prises au cours du traitement. Afin de limiter les risques associés aux prises de décisions, particulièrement lors de « l'ouverture » d'une modification, de nombreux travaux se sont orientés vers l'analyse des impacts des modifications.

L'analyse d'impacts permet d'évaluer les conséquences potentielles d'une modification et de détecter ses éventuelles propagations. Il devient donc possible de décider de l'ouverture d'une modification en ayant une vision du comportement simulé des modifications. La granularité de ces analyses peut varier selon l'approche considérée. Certaines identifient les impacts sur les composants alors que d'autres vont jusqu'à analyser les influences d'une modification sur les paramètres d'un composant. De même que pour la profondeur, le spectre de l'analyse peut aller des impacts sur les composants jusqu'aux conséquences pour les projets de développement en cours en passant par les activités remises en cause. La profondeur et le spectre des analyses d'impacts reposent donc en grande partie sur la modélisation du produit et de l'organisation et sur le choix d'une méthode de simulation (réseaux de Pétri, approche probabiliste, diagrammes de causalité, etc.). Si certaines des approches envisagées fournissent des analyses quantitatives des impacts des modifications, il semble aujourd'hui préférable de réaliser des analyses qualitatives puisque la pertinence des modèles (adéquation avec la réalité, mises à jour, etc.) et leurs robustesses peuvent être remises en cause selon la complexité des cas étudiés.

Si l'analyse d'impacts ne constitue qu'une optimisation locale du processus de traitement des modifications, d'autres travaux visent à apporter une amélioration globale du processus. Ils ont pour objectif, par l'intermédiaire d'applications informatiques de supporter le traitement des modifications. Elles intègrent donc des fonctions de supervision et de pilotage, des fonctions supportant la collaboration entre les acteurs impliqués dans le traitement et finalement des fonctions de gestion documentaire.

Dans le chapitre 4, nous présenterons les modèles que nous avons retenus dans le cadre de notre proposition méthodologique pour l'amélioration du traitement des modifications dans les ensembles complexes. Nous analyserons l'adaptation des modèles aux enjeux et aux objectifs de la gestion de configuration dans l'industrie aéronautique. Le

chapitre 5 détaillera l'implantation dans un outil informatique de certains de ces modèles : un premier retour d'expérience industrielle sur cet outil complètera ce chapitre.

Chapitre 4

Proposition d'une méthode de traitement des modifications lors du développement d'un produit complexe

1 Introduction

Le contexte de l'étude, détaillé dans le chapitre 1, et les prescriptions apportées par les normes de gestion de configuration (chapitre 2), montrent la nécessité d'enrichir le traitement des modifications lors des phases de développement au delà d'un simple processus administratif. Ce traitement est en effet un processus stratégique pour les organisations industrielles si l'on en juge par les améliorations et les optimisations suggérées au chapitre 3.

Dans ce sens, ce chapitre propose, une méthode de traitement des modifications reflétant à la fois la démarche de résolution de problèmes habituellement mise en œuvre par les concepteurs, mais aussi les contraintes de pilotage associées à la fonction d'architecte / intégrateur de l'avionneur représentée dans le processus de développement d'un nouvel avion par les gestionnaires de configuration. Nos propositions traitent donc de la gestion des modifications sous l'angle du produit et de son processus PLM, mais également sous l'angle de l'organisation et du projet de développement

Dans un premier temps, nous introduisons les grands principes de la méthode en prenant soin de préciser son périmètre d'application. Ensuite, chacune de ses phases est détaillée en mettant en évidence les concepts sur lesquels elle repose. Puis, nous soulignons les apports et les limitations de la méthode proposée en l'analysant selon les impacts qu'elle pourrait engendrer sur les pratiques, les processus et les outils de l'organisation. Enfin, nous évoquons la mise en œuvre de la méthode dans un environnement de travail collaboratif en introduisant le concept d'espace virtuel partagé.

2 Proposition d'une méthode de traitement des modifications

Au cours des phases de développement, le traitement d'une modification doit refléter les objectifs de quatre processus pouvant être considérés de façon distincte :

- un processus de description du problème qui vise à mieux cerner ses caractéristiques et son périmètre,
- un processus de conception visant à définir les solutions qui y répondent;
- un processus de pilotage (également appelé processus de coordination) dont l'objectif est de garantir l'intégration finale du produit et la coordination de

l'ensemble des acteurs impliqués dans le traitement, qu'ils soient ou non concernés par le problème à résoudre.

- un processus de mise en œuvre (déploiement) qui exécute les prescriptions issues de la conception.

Aujourd'hui, la méthode proposée (et détaillée dans la partie 2.2) intègre les trois premiers processus pour un traitement plus efficace des modifications³⁴.

2.1 Le traitement d'une modification conjugue un processus de résolution de problème et un processus de coordination

Une modification peut être considérée comme un problème auquel une solution doit être apportée. Pourtant, l'évaluation de ce problème et la conception des solutions ne peuvent pas être décorrélées. En effet, ces deux phases ne sont pas consécutives mais se déroulent en parallèle du fait de leurs interactions comme le précisent Darses et al. dans [DAR01] « il n'y a pas le problème qui précède la solution » (Cf. Figure 37).

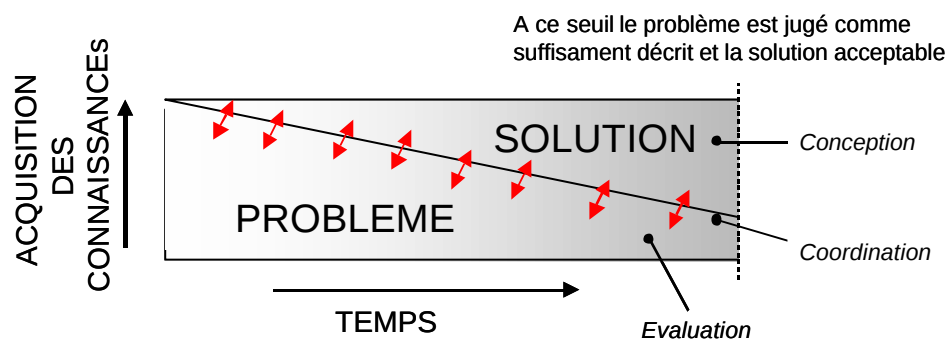


Figure 37 : Le problème et la solution se construisent simultanément

Mais plutôt que de parler de solutions, il est plus approprié ici d'introduire le concept d'espace de solutions. Car il n'existe pas de solution optimale mais un ensemble de solutions acceptables. Ainsi, l'espace de solutions est défini comme l'ensemble des solutions dont les variables satisfont le problème posé. De la même manière, on ne parlera pas de problème mais du périmètre du problème qui comprend la description de l'ensemble des caractéristiques que la solution devra satisfaire. Ainsi, les processus conduisant à formaliser et analyser un problème, donc à préciser son périmètre, influent sur l'espace des solutions définies au travers de la génération des premiers concepts. Réciproquement, la définition progressive des solutions acceptables fait apparaître de nouvelles informations qui devront être intégrées comme des caractéristiques du problème. Le but de l'activité de résolution de problème, quand l'objectif est clairement défini, est donc de faire converger l'espace des solutions avec le périmètre du problème. Le cas idéal étant que les variables d'une des solutions de l'ensemble satisfassent pleinement l'objectif de la résolution ainsi que les caractéristiques du problème. Si ce recouvrement n'est pas possible un compromis doit être négocié entre les acteurs de la résolution afin de dégrader certaines caractéristiques du problème ou optimiser certaines variables pour qu'une solution satisfaisant l'objectif puisse émerger. La résolution ne peut donc être efficace que si elle est réalisée collectivement et lorsque l'exploitation de connaissances croisées devient possible. Puisque, à priori, la solu-

³⁴ L'étude du processus de déploiement des modifications sort du cadre de cette étude.

tion est le résultat d'une action collective, il n'existe pas de chemin prédéfini vers une solution. Elle se construit de manière opportuniste grâce aux interactions entre les acteurs.

Si cette démarche cognitive de résolution de problèmes s'accorde avec les pratiques mises en œuvre lors de la conception de nouveaux produits, elle s'accommode mal avec les contraintes inhérentes au traitement des modifications lors du développement d'un produit complexe dans une entreprise étendue. En effet, du point de vue des acteurs de la conception, l'activité de résolution de problèmes est largement observable au cours des processus dans lesquels ils sont impliqués. Par contre, cet aspect de leur activité ne permet pas de répondre aux objectifs du constructeur devant limiter l'incidence des modifications sur le projet de développement en cours et coordonner efficacement le réseau de partenaires et de sous-traitants sur lequel repose le projet dans un environnement pavé d'aléas. Les dimensions d'Architecte / Externalisateur associées au rôle du constructeur ne se reflètent donc pas dans le processus de résolution de problème. Pour un traitement efficace des modifications, le processus de résolution de problèmes doit donc s'accompagner :

- de moyens de pilotage et de supervision comme lors de toute gestion de projet d'ingénierie,
- de moyens de pilotage de la coordination permettant de contrôler les interactions entre les acteurs de l'entreprise étendue et de gérer les évolutions aux interfaces du produit,
- d'un pouvoir décisionnel permettant d'établir des points de vue uniques à certaines phases du traitement à partir des négociations entre acteurs et des évaluations du résultat des tâches intermédiaires.

Ces fonctions sont généralement assurées par les gestionnaires de configuration. Ils sont responsables de la définition et de l'évolution des sous-ensembles remarquables d'un avion comme nous le verrons dans la partie 2.2.2.

Pour ces différentes raisons, le traitement des modifications doit être considéré à la fois comme :

- un processus de **description du problème** qui vise à mieux cerner les caractéristiques et le périmètre de la demande de modification à traiter,
- un processus de **conception** visant à définir les solutions qui y répondent à ce problème,
- un processus de **conduite de projet** de modification permettant de limiter l'incidence de chaque traitement sur les activités de développement,
- et un processus de déploiement et **d'implantation** des solutions (qui ne sera pas par la suite abordé).

2.2 Introduction de la proposition de méthode pour un traitement plus efficace des modifications

A partir des constations précédentes, cette section introduit la méthode de traitement des modifications en définissant au préalable ses objectifs et son périmètre. Ces informations permettront de différencier les éléments génériques des éléments propres au contexte de réalisation de l'étude. Le but de ces travaux est de contribuer à une gestion plus efficace des modifications lors des phases de développement des produits com-

plexes en ingénierie concurrente. In fine, l'objectif principal est de supporter les trois processus sous-jacents suivants sur les quatre décrits dans la section 2.1.

	Processus de définition du problème	Processus de conception des solutions	Processus de coordination
Adapter le processus de traitement aux types de modifications à traiter		x	x
Faciliter l'accès aux informations lors du traitement d'une modification	x	x	x
Analyser l'impact des modifications et des solutions	x	x	x
Piloter et contrôler le processus de traitement			x
Supporter les prises de décisions			x
Mettre en place des dispositifs de collaboration dans le processus.	x	x	x
Permettre la réutilisation des informations			x
S'assurer de l'intégrité fonctionnelle du produit			x
Adapter le processus de traitement à la configuration de l'organisation			x
S'assurer de la traçabilité des informations générées en vue de la certification du produit		x	x

Tableau 23 : Correspondance entre les besoins opérationnels et les processus sous-jacents

Si l'ensemble de ces besoins est exprimé par rapport au traitement des modifications, ils peuvent avoir des incidences sur d'autres processus de l'organisation. Pour cette raison, il est à ce stade utile de préciser le périmètre de la méthode proposée et de définir les processus ciblés.

2.2.1 Processus ciblés et périmètre de la méthode

Si le processus de traitement des modifications repose en partie sur des processus d'analyse de problème, de conception des solutions et de coordination, il a également des incidences sur d'autres processus majeurs de l'organisation (Cf. Figure 38).

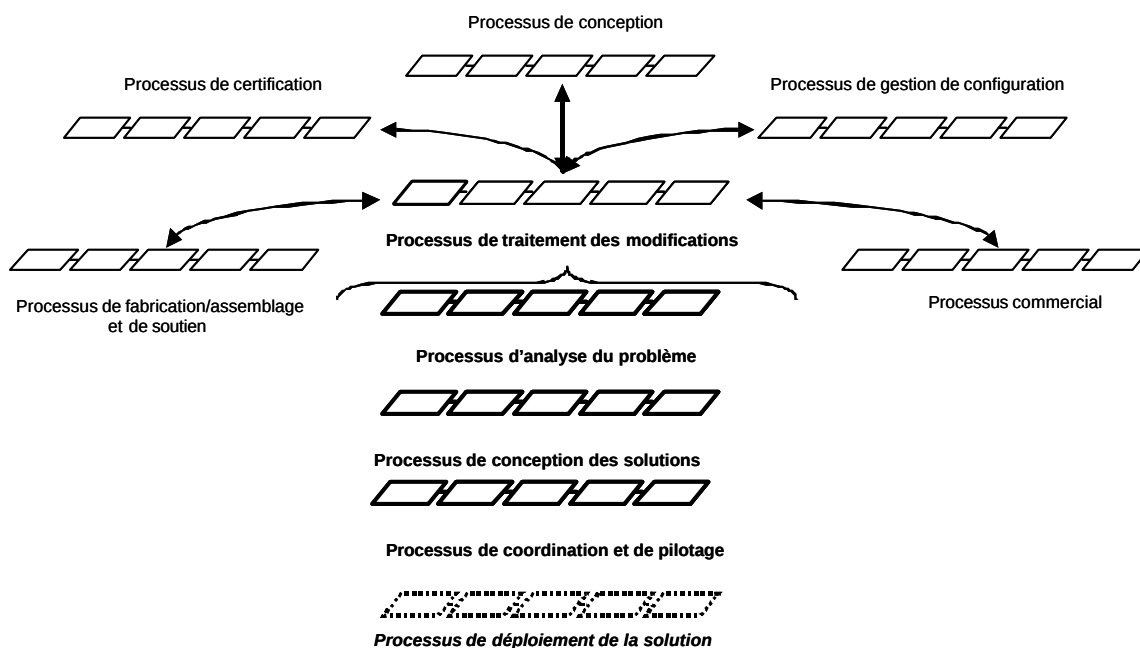


Figure 38 : Incidence de la gestion des modifications sur d'autres processus de l'organisation

Cette méthode se focalise uniquement sur les processus de traitement des modifications et, par conséquent, sur les quatre processus sous-jacents. Toutefois, ce processus interagit très fortement avec :

- *le processus gestion de configuration*. Le traitement des modifications fait partie intégrante de la maîtrise des modifications telle que décrite dans les normes de gestion de configuration. A ce titre, les mécanismes de traitement s'appuient sur les informations rattachées à la structure du produit.
- *le processus commercial*. Le traitement d'une modification relative à un appareil déjà alloué à une compagnie fait très souvent l'objet de négociations et d'échanges dans un cadre commercial (voire contractuel). Lorsqu'elle n'est pas relative à un appareil déjà alloué et qu'elle concerne une option, alors une démarche d'enrichissement du catalogue doit être définie.
- *le processus de conception*. Le patrimoine informationnel du produit rattaché à la structure qui le décrit est enrichi au fil des phases de conception et de définition. Les informations manipulées lors du processus de traitement des modifications doivent être le reflet de l'état courant de ce patrimoine informationnel.
- *le processus de certification*. L'ensemble des modifications apportées au produit doit être certifié. Il existe donc une très forte interaction entre le processus de gestion de modifications et le processus de certification.
- *les processus de fabrication, d'assemblage et de soutien*. L'attribution d'une effectivité à une modification, puis aux solutions qui en découlent, dépend en grande partie des plannings de production. L'effectivité dépend donc des tâches à réordonnancer production. De plus, l'introduction d'une modification peut avoir des répercussions sur les moyens de fabrication (montages, postes, lignes, outillages) ainsi que sur les procédures de maintenance.

Si l'on positionne maintenant ces processus par rapport au cycle de vie du produit, la méthode proposée dans le cadre de ces travaux ne concerne que les phases de développement d'un nouvel appareil. Parler de « phase de développement » peut être considéré comme un abus de langage, si nous tenons compte du cycle de vie de l'appareil décrit par le constructeur (Cf. Figure 2 du chapitre 1). Par « phase de développement » nous entendons ici principalement les phases de conception et de définition avec une partie de la phase de développement, des jalons M3 à M13.

2.2.2 Acteurs concernés

Puisque le périmètre de la méthode proposée est limité aux processus de traitement des modifications ainsi qu'aux processus sous-jacents auxquels ils font appel, il devient possible de déterminer les acteurs concernés par cette méthode. Trois types d'acteurs ont été identifiés : les gestionnaires de configuration, les acteurs métiers et les comités de contrôle de configuration.

2.2.2.1 Les gestionnaires de configuration

Ils sont responsables de la configuration d'un ensemble (ou un sous-ensemble) du produit décrit au travers de sa structure informationnelle. Ils doivent maintenir la cohérence de la configuration de l'ensemble dont ils ont la charge en s'assurant du bon déroulement de la conception et en supervisant le traitement des modifications qui lui sont liées. Lorsqu'une modification se propage vers d'autres sous-ensembles, ils sont donc amenés à collaborer avec les gestionnaires de configuration responsables des sous-ensembles concernés.

2.2.2.2 Les acteurs métiers

Les acteurs métiers peuvent avoir différents rôles et peuvent intervenir à diverses phases du processus de traitement s'ils sont sollicités par le gestionnaire de configuration. Il existe trois grandes catégories d'acteurs métiers :

- les chefs de projet sont responsables du projet de conception d'un sous-ensemble de l'avion et donc de son pilotage. Il s'assure donc de la réalisation des objectifs convenus en termes de coûts, délais et qualités. A ce titre, ils peuvent donc être amenés à participer au traitement d'une modification (étude technique, allocation de ressources, évaluation technique des solutions, etc.)
- les concepteurs en charge du développement des solutions techniques en réponse à une demande de modification,
- les analystes qui interviennent pour analyser les problèmes soumis ainsi que les solutions et qui y répondent selon un point de vue particulier (acoustique, analyse de structures, etc.),
- les spécialistes qui peuvent intervenir à n'importe quelle phase du processus, du fait de leur expertise, s'ils sont sollicités par les deux autres catégories d'acteurs précédentes ou par le gestionnaire de configuration.

Quelle que soit la catégorie à laquelle ils appartiennent, ces acteurs métiers :

- répondent à une logique d'action : le développement d'une solution répondant aux besoins exprimés lors de la demande de modification,
- obéissent à des règles métier (concepteur, systémier, calculateur, préparateur, spécialiste de maintenance, etc.) qui sont les connaissances communes d'un groupe,
- représentent une entité de l'organisation de l'entreprise,
- ajustent leurs efforts en fonction des objectifs assignés par le gestionnaire de configuration.

2.2.2.3 Les comités de contrôle

Le comité de contrôle de la configuration est une instance organisationnelle représentant l'ensemble des entités concernées par le traitement d'une modification. Il a un rôle essentiellement décisionnel dans le processus de traitement comme nous le verrons dans la section 3.

2.2 La méthode de traitement – Modèle global

Avant de présenter plus en détail la méthode proposée, nous proposons d'introduire ci-dessous son modèle global et la manière dont il est construit.

Cette méthode s'appuie principalement sur les observations de terrain, relatives aux traitements des modifications, que nous avons été amenés à faire dans le cadre de ces travaux :

- mises en œuvre chez le constructeur aéronautique européen AIRBUS. Ces observations sont également confrontées à celles effectuées dans d'autres industries telles que l'industrie automobile [DAC01],
- préconisations des normes de gestion de configurations (Cf. Chapitre 2),
- implémentations dans les outils de types PLM (Cf. Chapitre 2),
- analyse bibliographiques relatives aux travaux de recherches déjà conduits (Cf. Chapitre 3).

L'observation des processus, mais aussi leur critique, a permis d'aboutir au constat suivant : le processus de traitement des modifications est l'exécution simultanée de trois processus participant à la réalisation d'objectifs distincts et mettant en œuvre des compétences variées. Ainsi, dans le processus de traitement des modifications, nous distinguons les activités qui relèvent du processus d'analyse du problème de celles qui relèvent de la conception des solutions techniques ou encore du processus de coordination (Cf. Figure 39).

Ce modèle global s'appuie principalement sur la norme de gestion de configuration aéronautique RG Aéro 00023 [BNA97] tout en tenant compte des préconisations formulées pour la gestion des programmes aéronautiques par la norme RG Aéro 00040 [BNA99]. Le but visé est ici de définir un processus de traitement des modifications simplifié, générique et suffisamment précis pour répondre aux enjeux des programmes aéronautiques.

Le processus proposé est déclenché par l'apparition d'un fait technique. Un fait technique est ici considéré comme un problème soulevé par un acteur³⁵, impliqué dans le cycle de vie du produit, auquel une réponse (en réalité une solution technique analysée) doit être apportée. L'implantation physique de cette réponse sera considérée comme la clôture du processus de traitement. Bien qu'elle soit primordiale, nous ne détaillons pas cette phase spécifique dans le cadre de nos travaux.

Malgré la distinction faite entre les trois processus, chacune des trois catégories d'acteurs identifiées ne peut être associée à uniquement l'un de ces processus. En effet, la réalisation de certaines des activités ne peut être que le fruit de la coopération entre différents corps de métiers / rôles. La coopération entre les acteurs garantit l'analyse pertinente du problème posé mais aussi l'émergence d'une solution satisfaisante [LEG03].

Avec cette méthode, certaines des tâches identifiées des trois processus se déroulent simultanément. De plus, les échanges d'informations entre tâches des processus les rendent dépendantes. C'est pour cette raison qu'il est difficile de décorréliser ces trois processus lors du traitement d'une modification

³⁵ C'est pour cette raison que nous parlons d'une demande de modification.

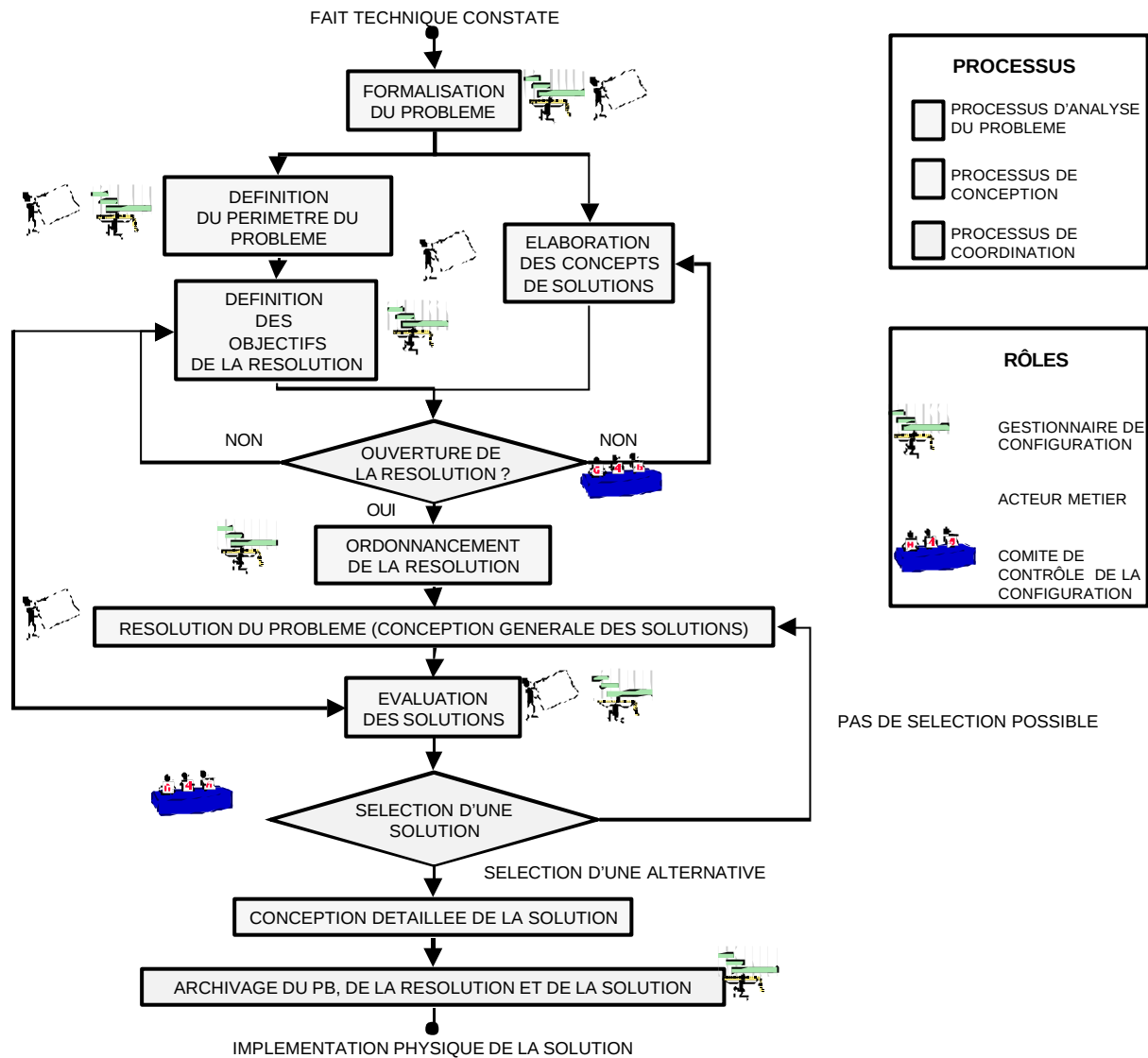


Figure 39: Modèle global de la méthode de traitement proposée (rôles et processus)

Un fait technique n'est généralement constaté que par un acteur ou un groupe restreint d'acteurs. La nature des informations issues de ce premier constat est très hétérogène, parfois précise, souvent floue. Il convient donc de formaliser le problème afin que d'autres acteurs puissent se l'approprier lorsqu'ils auront à intervenir dans le traitement. Au-delà de la formalisation du problème, le processus d'analyse permet de déterminer son périmètre, ses enjeux et ses possibles répercussions mais aussi de fixer les objectifs auxquels devra se conformer la résolution (le processus de résolution mais aussi la solution qui en découlera).

Le processus de conception vise, quant à lui, à élaborer une solution technique conforme aux objectifs fixés lors de l'analyse du problème. Puisque la définition du problème est inséparable de la construction de la solution, certaines activités sont réalisées de manière parallèle. Lors du traitement d'une modification, le processus de conception qui est mis en œuvre conduit tout d'abord à élaborer un ensemble de solutions alternatives parmi lesquelles une et uniquement une solution sera sélectionnée.

Puisque les modifications sont relatives dans cette étude aux produits en cours de développement, leurs processus de traitement sont fortement contraints par les processus de conception et de définition en cours. Malgré ces contraintes, le processus de traitement ne doit pas affecter les résultats obtenus par les équipes de développement souvent distribuées même si l'ordonnancement de leurs activités peut être altéré. Le constructeur doit donc s'assurer de la cohérence du traitement avec le cycle de vie du produit en pilotant le processus et en coordonnant les acteurs qui y sont impliqués. Si la Figure 39 montre que les décisions prises au cours du traitement dépendent de ce processus de coordination, l'activité de pilotage n'est pas représentée. Pourtant, afin de garantir l'intégration finale du produit, le pilotage est effectué de manière continue par les représentants désignés par le constructeur. Ces représentants, appelés gestionnaires de configuration, sont délocalisés dans les équipes de développement associées aux sous-ensembles majeurs.

Dans la section suivante, nous détaillons plus encore ces trois processus en décrivant chaque activité composant la méthode.

3 Description de la méthode

Afin de décrire cette méthode, nous avons privilégié une approche séquentielle guidée par les activités définies par la Figure 39. Par conséquent la Figure 39 représente un algorithme plutôt que des modèles de rôles et de processus synchronisés. La compréhension du processus et de l'enchaînement des activités qui le compose est donc facilitée.

Pour chaque activité sont tout d'abord décrits ses objectifs, les acteurs impliqués ainsi que les informations utilisées en entrée et celles produites en sortie. Les informations que nous mettons en évidence visent à identifier le type d'informations manipulées mais ne reflètent pas leur état. En effet, le processus de traitement est concourant et les acteurs peuvent manipuler des informations à différents stades de maturité.

3.1 Définition et analyse du problème

A partir de la constatation d'un fait technique, le processus de définition et d'analyse du problème permet de formaliser une demande de modification, analyser et définir son périmètre, fixer les objectifs d'une résolution. Les résultats de cette analyse permettront de décider si une réponse doit être apportée à ce problème en se basant sur les premiers concepts de solutions recueillis.

3.1.1 Formalisation du problème : de la prise en compte d'un fait technique à la création d'une modification

Objectifs de l'activité	▪ Réunir les informations relatives au fait technique. ▪ Remplir les formulaires de demande de modification conformément aux procédures de gestion de configuration établies par l'organisation.
Acteurs impliqués	▪ Gestionnaire de configuration de l'ensemble concerné. ▪ Acteurs Métiers.
Informations en entrée	▪ Un fait technique dont les informations sont peu structurées ou structurées selon les procédures de l'acteur ou de l'organisation qui l'a constaté.
Informations en sortie	▪ Une demande de modification formalisée, renseignée et documentée selon les procédures de gestion du constructeur.

Tableau 24: Formalisation du problème – de la prise en compte d'un fait technique à la création d'une demande de modification

Cette phase de la méthode, vise à structurer le problème soumis par le découvreur d'un fait technique (un acteur impliqué ou ayant une incidence sur le cycle de vie du produit) afin que le traitement s'appuie sur une demande de modification formalisée. La formalisation se fait au travers des procédures de gestion de configuration permettant de structurer les informations relatives à la demande (après attribution d'un identifiant unique) :

- **Informations sur l'origine de la demande de modification :**
 - l'émetteur de la demande
 - le type de demande (interne, compagnie cliente, fournisseur, certification)
- **Informations sur le problème soulevé :**
 - le chapitre (ou sous chapitre) ATA concerné (répercussions fonctionnelles)
 - le(s) sous-ensemble(s) physique(s) impacté(s)
 - la description du problème
 - les premiers concepts de solutions proposés (Cf. 3.1.4)
 - les liens vers d'autres modifications s'il en existe
 - une proposition d'applicabilité (en terme d'instance de produit, c'est à dire en MSN)
- **Information sur les répercussions de la demande connues à ce stade :**
 - les impacts sur le processus ou l'objet de la certification
 - l'influence potentielle sur les tests en vols
 - la possibilité de « retrofit »
 - la possibilité d'émettre des « service bulletins »³⁶ vers les compagnies
 - les répercussions sur l'interchangeabilité des composants

Cette structuration permet de caractériser le fait technique selon l'origine de la demande, de décrire le problème et d'évaluer les répercussions potentielles sur d'autres phases du cycle de vie du produit. Si ce type de caractérisation s'est pendant longtemps appuyé sur des procédures et des circuits d'information au format papier, il est maintenant possible de tirer avantage des documents au format numérique. Ils rendent plus aisée la structuration du document en limitant les possibilités offertes aux acteurs,

³⁶ Les « Services Bulletins » permettent de proposer aux compagnies clientes des modifications étudiées par les constructeurs. L'application de ces modifications est ensuite à la charge des compagnies clientes.

permettent une circulation plus rapide entre les acteurs impliqués et facilitent l'accès aux informations relatives à une demande de modification.

3.1.2 Définition du périmètre du problème : définition de l'étendue de la modification

Les répercussions soulevées lors de la phase de formalisation du problème (Cf. 3.1.1), ne concernent que les impacts de premier ordre sur des sous-ensembles (ou composants) ainsi que les répercussions envisageables sur le cycle de vie du produit. Cette première analyse, faite à partir des informations disponibles à ce stade et sans recoupement avec d'autres informations du patrimoine informationnel du produit, ne prend pas en compte le phénomène de propagation des modifications. Cette phase de la méthode vise maintenant à déterminer le périmètre de la modification en prenant en compte le phénomène de propagation, au travers d'une analyse d'impacts mais en cherchant également à optimiser le futur effort de traitement grâce à l'étude des groupements possibles de modifications.

Objectifs de l'activité	▪ Déterminer l'impact de la modification et les propagations possibles vers d'autres composants. ▪ Déterminer les conséquences sur le cycle de vie du produit. ▪ Déterminer les équipes de développement affectées.
Acteurs impliqués	▪ Gestionnaire de configuration des ensembles concernés. ▪ Acteurs Métiers.
Informations en entrée	▪ Une demande de modification formalisée, renseignée et documentée selon les procédures de gestion du constructeur. ▪ Le patrimoine informationnel du produit.
Informations en sortie	▪ Le périmètre de la modification en terme de composants impactés, de processus et d'équipes affectés.

Tableau 25: Définition du périmètre du problème – définition de l'étendue de la modification

3.1.2.1 Analyse d'impact des modifications

Dans le chapitre 2, nous avons vu qu'un des enjeux majeurs du traitement d'une modification est la maîtrise de sa propagation vers d'autres composants du produit au-delà du premier composant impacté. Si elles ne sont pas maîtrisées, les propagations deviennent des causes de surcoûts et d'allongement des délais de développement. Le but de l'analyse d'impacts est de détecter ces propagations.

Les propagations sont véhiculées par les contraintes qui lient deux composants. On parle de propagation directe quand la modification d'un composant implique directement la modification d'un autre composant au travers de la contrainte qui les unit. Si ce composant entraîne à son tour la modification d'un autre composant, nous parlerons alors de propagation indirecte depuis le premier composant. A ce stade, il est important de préciser que pour qu'il y ait propagation, il faut que la validité de la contrainte qui unit les deux composants ne soit plus vérifiée.

La démarche d'analyse d'impacts proposée ici vise à identifier les propagations possibles sans pour autant les quantifier. Le but est d'assister l'acteur dans son analyse afin qu'aucune propagation potentielle ne soit omise dans ses investigations. Ainsi, l'analyse plus détaillée de chaque propagation possible dépend de l'expérience de l'analyste et de sa connaissance du système. Dans ce sens, la démarche proposée permet aux acteurs d'appréhender la complexité du système faisant l'objet d'une demande de modification.

La démarche proposée peut être scindée en trois phases principales. La première phase consiste à enrichir les modèles produit sur lesquels repose l'analyse d'impacts. La seconde est l'analyse proprement dite. Enfin, la dernière phase est l'exploitation des résultats de cette analyse.

A *Enrichissement informationnel des modèles produit*

L'enrichissement informationnel proposé est basé sur les lacunes observées dans les modèles produit implémentés dans les outils PLM manipulés durant les phases de développement (Cf. Chapitre 2). Ils représentent le produit comme une arborescence d'ensembles et sous-ensembles puis en composants de plus bas niveaux. La décomposition identifie les contraintes d'assemblage entre les composants d'un système (**lien de composition**). Un autre type de lien est également mis en œuvre dans ces modèles ; il s'appuie sur la représentation multi-vues et permet de représenter l'association entre deux composants de vues différentes. Les **liens d'association** permettent de visualiser l'évolution d'un composant dans son cycle de vie. Pourtant, ces seuls liens ne suffisent pas à déterminer les propagations possibles entre composants. Les modèles produits doivent donc être enrichis afin de refléter les contraintes existantes entre les composants du système étudié :

- **les liens de dimensionnement** indiquent l'existence d'une dépendance entre les paramètres de deux éléments. La remise en cause de l'un de ces paramètres (hors des tolérances qui lui ont été assignées) peut conduire à la remise en cause de caractéristiques de l'autre élément.
- **les liens de positionnement** identifient que deux composants sont localisés dans un environnement proche et que le déplacement de l'un d'eux peut induire une collision avec le second. Si la localisation est importante, la géométrie des composants joue également un rôle primordial lorsque deux composants ont une interface commune. Les informations sur les liens de positionnement sont généralement associées à la maquette numérique et elles sont manipulées au travers du module d'analyse des interférences (« clash analysis »).
- **les liens de dépendance organisationnelle** permettent d'identifier que deux composants sont placés sous la même responsabilité au sein de l'organisation. Ce type de lien permet de détecter qu'une modification se propage d'une entité de l'organisation vers une autre, comportement à maîtriser afin que le traitement de la modification n'implique si possible qu'une seule entité de l'organisation. C'est une stratégie de confinement des modifications.
- **les liens de dépendance fonctionnelle** rattachent des composants physiques à des fonctions. Ainsi, lorsqu'une fonction est remise en cause, il devient possible d'identifier les organes physiques susceptibles d'être impactés. L'opération inverse est également valable. Cette nature de liens permet de garantir l'intégrité fonctionnelle du produit malgré les modifications qui pourraient être apportées aux composants physiques.

L'enrichissement des modèles par l'apport de liens supplémentaires entre les composants d'un système permet d'établir les contraintes entre composants au sein d'un système. Avec ces liens, qui peuvent être bidirectionnels, le système n'est plus une simple structure arborescente mais plutôt un réseau de sous-ensembles et de composants (Cf.

Figure 40). Par un parcours de ce réseau, il devient possible de déterminer les propagations potentielles d'une modification.

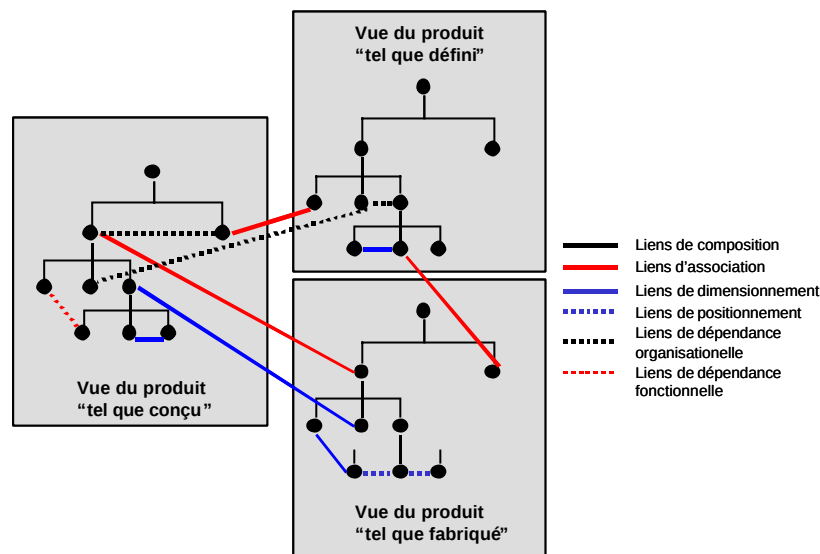


Figure 40 : La structure du produit comme un réseau

Cet enrichissement des modèles est réalisé au cours du développement par les acteurs de la conception. Pour réaliser cette opération, ils s'appuient sur les connaissances qu'ils ont acquises par rapport au système qu'ils conçoivent mais aussi sur l'expérience de l'équipe de conception à laquelle ils appartiennent. L'enrichissement des modèles proposé dans le cadre de cette méthode constitue donc une tâche supplémentaire pour les concepteurs puisqu'au delà de la création des liens, c'est leurs évolutions qui doivent être maîtrisées (Cf. 3.3.2). La question des outils pour la création et la maintenance de ces liens sera évoquée plus loin dans ce document.

Afin d'illustrer les différents types de liens utilisés pour l'enrichissement des modèles produits, un exemple issu de l'industrie aéronautique est donné en annexe de ce document.

B Analyse d'impacts

Avec les modèles produit enrichis, les acteurs impliqués dans le traitement des modifications ont accès aux composants du système ainsi qu'aux liens de dépendance. Ces dépendances ne sont pas figées et évoluent au fur et à mesure du déroulement de la conception. Elles reflètent l'état d'un système à un instant donné. L'analyse des impacts d'une modification prend en compte l'état courant du modèle produit et donc les liens mis à jour et validés au moment de sa réalisation.

L'analyse d'impacts d'une modification consiste à déterminer les propagations directes et indirectes possibles d'une modification en prenant comme origine le composant (ou le sous-système) faisant l'objet de la demande de modification. L'analyse s'effectue niveau par niveau et, à chacun de ces niveaux, un choix est laissé à l'acteur pour poursuivre l'analyse sur la totalité des composants impactés au niveau précédent, ou seulement sur une partie de ceux-ci ; l'acteur peut aussi clôturer l'analyse.

La démarche d'analyse est présentée dans les tableaux suivants. Le Tableau 26 présente la démarche d'analyse pour le premier niveau, le Tableau 27 pour le second niveau. La Tableau 28 généralise cette démarche pour les n niveaux suivants.

Données initiales	- La demande de modification - Le composant impacté à la source de la demande de modification - Le modèle produit enrichi (6 types de liens disponibles entre entités)
Actions	- Identifier les composants liés au composant source - Créer une arborescence permettant de visualiser le composant initialement impacté, et les composants liés selon la typologie définie.
Résultats	- Les propagations directes possibles de la modification vers d'autres composants du modèle produit. - La caractérisation des propagations selon les liens qui les véhiculent. - La nature des modifications pour chaque composant ou système impacté

Tableau 26 : Analyse d'impacts premier niveau

A l'issue de la première phase de l'analyse, l'acteur dispose donc d'une vision des propagations possibles et directes d'une modification. La notion de « propagations possibles » est ici très importante. L'analyse ne permet pas de prédire les propagations réelles de la modification mais propose l'ensemble des propagations qui pourraient survenir. L'acteur est conduit à mener des investigations selon les impacts proposés.

A partir de ces résultats issus de l'analyse menée au premier niveau, il est possible de déterminer les impacts indirects possibles de la modification initiale

Point de départ	- La demande de modification - La sélection d'un composant pouvant être impacté par une propagation directe de la modification (résultats de l'analyse menée au premier niveau) - Le modèle produit enrichi (6 types de liens disponibles entre entités)
Actions	- Identifier les composants liés au composant sélectionné - Enrichir l'arborescence créée lors de l'analyse au premier niveau permettant de visualiser le composant sélectionné, et les composants liés selon la typologie définie - Un composant (identifié comme un composant susceptible d'être impacté par une propagation directe) au premier niveau peut être sélectionné et l'analyse reconduite si toutefois ce composant n'a pas été identifié comme un impact possible lors des analyses conduites aux niveaux 1 et 2 (contrainte de bouclage)
Résultats	- Les propagations indirectes possibles de la modification initiale vers d'autres composants du modèle produit. - La caractérisation des propagations selon les liens qui les véhiculent. - La nature des modifications pour chaque composant ou système impacté.

Tableau 27 : Analyse d'impacts au second niveau

L'analyse du second niveau montre les impacts indirects possibles de la modification initiale d'un composant du système. Elle ne prend pas en compte les propagations simultanées des modifications (c'est à dire la sélection de deux composants à la fois) car les comportements des systèmes sont dans ce cas mal maîtrisés. De plus, une contrainte permettant d'éviter les bouclages est définie. Ainsi, un composant du système ne peut être impacté qu'une fois par la propagation d'une modification.

Puisqu'une modification peut se propager au-delà du second niveau, l'analyse d'impacts peut être généralisée pour les n niveaux suivants (Tableau 28).

Point de départ	- La demande de modification - La sélection d'un composant pouvant être impacté par une propagation indirecte de la modification (résultats de l'analyse menée au niveau $n-1$) - Le modèle produit enrichi (6 types de liens disponibles entre entités)
Actions	- Identifier les composants liés au composant sélectionné - Enrichir l'arborescence créée lors de l'analyse au niveau $n-1$ permettant de visualiser le composant sélectionné, et les composants liés selon la typologie définie - Un composant (identifié comme un composant susceptible d'être impacté par une propagation directe) au $n-1$ niveau peut être sélectionné et l'analyse reconduite si toutefois ce composant n'a pas été identifié comme un impact possible lors des analyses conduites aux niveaux précédents (contrainte de bouclage)
Résultats	- Les propagations indirectes possibles de la modification initiale vers d'autres composants du modèle produit. - La caractérisation des propagations selon les liens qui les véhiculent. - La nature des modifications pour chaque composant ou système impacté.

Tableau 28 : Analyse d'impacts au niveau n

La méthode d'analyse ainsi que les algorithmes proposés assistent l'acteur dans ses investigations en identifiant l'ensemble des composants susceptibles d'être impactés directement par une modification ou indirectement du fait de sa propagation.

C Exploitation des résultats de l'analyse

A ce stade du processus de traitement, l'analyse d'impacts permet de déterminer les répercussions possibles d'une demande de modification. La détermination de ces répercussions s'appuie sur les liens qui unissent les divers composants du système étudié et, contrairement à certaines démarches proposées dans le chapitre 3, ne prend pas en compte la probabilité d'apparition ou l'impact de la modification, en raison du manque de fiabilité des données sur lesquelles ces méthodes probabilistes s'appuient. A partir de l'architecture du système, elle ne vise qu'à déterminer les répercussions théoriquement possibles afin de guider l'acteur dans ses investigations. Celui-ci, selon son expérience et sa connaissance du système est ensuite libre de pousser plus loin une investigation sur un composant précis. Cette analyse, lorsqu'un système complexe fait l'objet d'une demande de modification, garantit que l'ensemble des impacts directs et possibles sera pris en compte par l'acteur.

Si l'analyse d'impacts d'une demande de modification est basée sur les composants d'un système, la demande de modification peut également avoir des impacts sur le projet de développement (aspect « process ») du système remis en cause ainsi que sur l'organisation industrielle qui le mène. La détermination des répercussions d'une modification sur le projet de développement ainsi que sur l'organisation est étroitement liée aux impacts sur le produit lui-même. Par conséquent, leur détermination repose en grande partie sur la qualité de la modélisation du processus de développement et de l'organisation mais surtout sur la prise en compte des liens qui unissent ces trois modèles. Dans ces travaux, nous admettrons qu'industriellement les modèles de processus et d'organisation de développement sont connus et maîtrisés. Il en va de même pour les liens qui les unissent qui, de plus, doivent être tenus à jour. Ainsi, à l'issue de cette phase du processus, l'analyse des répercussions directes et indirectes de la demande de modification concernant les composants, l'acteur du traitement a en sa possession les éléments suivants :

- les impacts de la demande de modification sur le processus de développement, c'est-à-dire les activités et les tâches qui pourraient être remises en cause,
- les unités de l'organisation susceptibles d'être impliquées dans le traitement de la modification puisque ses impacts potentiels sur le produit et le process sont définis.

La méthode d'analyse d'impacts proposée, comme l'ensemble de la méthode est évaluée dans la partie 4 : évaluation de la méthode. Mais il est d'ores et déjà possible de souligner qu'avec cette méthode, il n'est pas possible d'analyser l'apparition simultanée de deux voire plusieurs modifications puisque, dans ces cas, le comportement des systèmes n'est pas obligatoirement maîtrisé.

3.1.2.2 Groupements et découpage des demandes de modifications

L'analyse du problème et sa formalisation dépendent de l'ensemble des demandes de modifications disponibles à un instant donné. Il est rare que les gestionnaires de configuration aient à traiter une seule demande de modification. Cet aspect du traitement rejoint des problématiques de production industrielle comme la définition d'une stratégie de production (production unitaire ou par lot) en fonction des travaux à réaliser, sachant qu'un ensemble de modifications ne peut évidemment être assimilé simplement à un lot de produits.

Dans cet esprit, le regroupement de plusieurs demandes de modification à traiter en une seule permet de diminuer les temps et les coûts de traitement en factorisant les efforts de traitement et en minimisant les répercussions sur la disponibilité des acteurs. Pour que le regroupement de plusieurs modifications soit possible, il est nécessaire d'identifier leur commonalité. Cette identification est basée sur :

- l'impact de différentes demandes sur un même système ou l'un de ses composants,
- l'effectivité des demandes, c'est à dire leur intégration sur un même appareil,
- des tâches identiques à réaliser pour plusieurs demandes.

A l'inverse, une demande de modification peut être scindée en plusieurs demandes selon la complexité technique du domaine qu'elle couvre mais aussi selon les contraintes associées aux différents corps de métier impliqués dans le traitement. Cette démarche peut aussi être justifiée commercialement lorsque le coût des demandes peut être répercuté aux compagnies clientes.

A l'issue de cette phase, le périmètre de la demande de modification est défini et ses impacts possibles sur les composants, le projet de développement et l'organisation sont pris en compte.

3.1.3 Définition des objectifs de la résolution

Une fois le périmètre de la demande cerné, il est nécessaire de définir les objectifs du processus de traitement qui vise à y apporter une solution technique. Ces objectifs sont déclinés selon deux axes :

- les objectifs liés au traitement lui-même, exprimés en termes de coût et de délais : ce sont des objectifs **projet**,
- les objectifs liés à la solution technique devant être développée en terme de performances à remplir, de contraintes techniques à respecter mais aussi en terme d'implémentation, ce sont des objectifs **produit/process**.

Cette phase est résumée par le Tableau 29.

Objectifs de l'activité	▪ Définir les objectifs du traitement. ▪ Définir les objectifs que devra atteindre la solution technique à concevoir.
Acteurs impliqués	▪ Gestionnaire de configuration de l'ensemble concerné.
Informations en entrée	▪ La demande de modification. ▪ La définition du périmètre du problème (impacts potentiels sur des composants du système, le processus de développement et l'organisation).
Informations en sortie	▪ Les délais et les coûts prévisionnels associés au traitement de la demande de modification. ▪ Les performances auxquelles devra se conformer la solution technique, les contraintes techniques qu'elle devra respecter ainsi que son implantation.

Tableau 29 : Définition des objectifs de la résolution

Les objectifs sont définis par le gestionnaire de configuration à partir des informations issues des phases préliminaires du processus de traitement et communiquées par les autres acteurs du traitement. La définition des objectifs pour le gestionnaire de configuration se base principalement sur les spécifications initiales du système impacté, sur l'avancement du projet de développement et le déroulement du programme et sur les attentes des acteurs impliqués dans le cycle de vie du produit. Cette définition dépend en grande partie des capacités des gestionnaires de configuration à rassembler des informations de natures diverses, à les analyser, puis à arrêter une décision. Par conséquent, ils doivent être en mesure de localiser les informations pertinentes en fonction des objectifs à définir à partir des outils à disposition dans le processus de développement. Ils se basent également sur les réseaux d'acteurs avec lesquels ils entretiennent des contacts réguliers.

A l'issue de cette phase, les coûts et les délais de traitement sont fixés. A ce stade, ce ne sont que des informations prévisionnelles au-delà desquelles le traitement de la modification pourrait affecter le déroulement du projet de développement et éventuellement contrarier l'avancement du programme si la demande de modification est critique.

Parallèlement, les contraintes que devra respecter la future solution ainsi que les performances qu'elle devra remplir sont définies. Cette phase consiste à spécifier la future solution technique (soit nouvelle ou adaptée d'une solution existante). Au-delà des performances techniques et des contraintes, c'est le développement de la solution par rapport au cycle de vie du produit qui est important : le moment d'émission de la demande la modification et le moment où la solution technique doit être physiquement intégrée déterminent l'urgence du traitement. Ces éléments sont pris en compte lors de la détermination de l'effectivité de la future solution. L'effectivité d'une solution précise les appareils sur lesquels elle sera introduite. Elle peut être exprimée en appareils unitaires selon des plages précises (MSN1 à 25), par rapport à un standard selon des plages (ST.A 4-15) ou encore selon une version demandée par une compagnie aérienne également selon des plages (AF 8-2). L'effectivité peut être déterminée automatiquement par des algorithmes de calculs basés sur les informations suivantes :

- les composants impactés par les demandes de modification,
- l'ordre d'émission des demandes de modification,
- la validité des demandes de modification,
- l'ordonnancement et les plannings de production des appareils.

A l'issue de cette phase, les objectifs du traitement ainsi que les spécifications de la solution à développer sont connus de l'ensemble des acteurs.

3.1.4 Génération des premiers concepts de solution

Parallèlement aux phases de définition du périmètre de la demande de modification et de définition des objectifs, les premiers concepts de solution sont générés notamment par le demandeur de la modification du problème formalisé (Cf. Figure 39 et Tableau 30).

Objectifs de l'activité	▪ Générer les concepts sur lesquels sera basée la future solution technique. ▪ Proposer plusieurs alternatives.
Acteurs impliqués	▪ Acteurs Métiers.
Informations en entrée	▪ Une demande de modification formalisée, renseignée et documentée selon les procédures de gestion du constructeur.
Informations en sortie	▪ Plusieurs alternatives de solutions dont les concepts sont détaillés et documentés.

Tableau 30 : Génération des premiers concepts de solution

Généralement, le problème et la solution se construisent simultanément. Ainsi, lors de la formalisation et pendant l'analyse du problème, les premiers concepts de solutions sont élaborés par les acteurs impliqués. Généralement, la génération des premiers concepts s'appuie sur l'établissement d'analogies entre la demande de modification à traiter et des traitements ayant été réalisés dans le passé. Aujourd'hui, l'identification d'une analogie repose en grande partie sur l'expérience des acteurs et leurs connaissances afférentes au système en cours de développement. La gestion des connaissances au sein du processus de gestion des modifications constitue donc une voie d'amélioration notoire des performances de l'entreprise. A cette fin, la méthode intègre une phase d'archivage du processus et des informations associées destinée à l'identification d'analogies lors de futurs traitements mais aussi à faciliter leur réutilisation partielle (Cf. 3.3.2).

A ce stade, les concepts ne sont que très peu structurés, seuls les plans de principes sont disponibles. Ils sont toutefois suffisants pour comprendre « l'esprit » de la solution et être utilisés comme objet intermédiaire afin que les acteurs confrontent leurs points de vue.

Si l'ouverture de la modification est décidée alors ces concepts serviront de base pour une définition plus complète des solutions techniques.

3.1.5 Décision d'ouverture d'une modification

A ce stade du processus de traitement, il est important de s'interroger sur la suite à donner au traitement, c'est-à-dire si une solution technique doit être apportée comme réponse à la demande de modification initiale. Cette interrogation s'appuie sur l'évaluation du rapport utilité et gains apportés par la réponse et coûts, implications du traitement.

Objectifs de l'activité	▪ Décider de poursuivre une demande de modification, ne pas donner suite à la demande ou requérir un complément d'information.
Acteurs impliqués	▪ Comité de Contrôle de la Configuration.
Informations en entrée	▪ Une demande de modification formalisée, renseignée et documentée selon les procédures de gestion du constructeur. ▪ Le périmètre de la modification en terme de composants impactés, de processus et d'équipes affectés. ▪ Les délais et les coûts prévisionnels associés au traitement de la demande de modification. ▪ Les performances auxquelles devra se conformer la solution technique, les contraintes techniques qu'elle devra respecter ainsi que son implantation. ▪ Plusieurs alternatives de solutions dont les concepts sont détaillés et documentés.
Informations en sortie	▪ Suite à donner au traitement de la modification

Tableau 31 : Décision d'ouverture d'une modification

Le rapport « Gain / Effort » peut varier considérablement d'une demande de modification à une autre notamment du fait de son origine et du contexte dans lequel elle est formulée. De la même manière, l'effort de traitement peut varier selon la complexité de la demande. La décision d'ouverture d'une modification repose en partie sur la prise en compte de ce rapport et donc, sur la valeur ajoutée qu'elle pourrait apporter au produit et à l'organisation. Il existe toutefois des cas où la valeur ajoutée de la modification ne sera pas prise en compte dans la décision d'ouverture à la vue de son caractère obligatoire. C'est par exemple le cas lorsqu'une erreur doit être corrigée, que la sécurité ou la certification des appareils est en jeu. Au contraire, lorsque l'on parle d'une amélioration du produit au-delà des spécifications initiales ou de l'introduction d'une nouvelle option au catalogue, un processus commercial de revente de la modification peut être mis en place par le constructeur.

La décision d'ouverture de la modification est prise par le Comité de Contrôle de la Configuration sur la base des informations issues des phases précédentes, transmises par le gestionnaire de configuration, à savoir :

- la description du problème,
- l'analyse de ce problème et de ses possibles répercussions,

- la définition des objectifs,
- et les premiers concepts des solutions techniques.

Trois types de décisions peuvent être prises à l'issue de cette phase :

- une modification est ouverte, donc le traitement se poursuit et une solution technique sera développée puis introduite,
- aucune modification n'est ouverte et le traitement de la demande est abandonné,
- la décision d'ouverture est reportée car trop peu d'informations sont disponibles.

A l'issue de cette phase, et si son ouverture est décidée alors la « demande de modification » devient une « modification ».

3.2 Résolution du problème

La seconde phase du processus de traitement des modifications correspond à la résolution du problème posé par la demande de modification à partir de l'analyse conduite lors des phases préliminaires du traitement. Dans les faits, la résolution correspond au développement d'une solution technique.

Cette phase est elle-même composée de quatre sous-phases :

- l'ordonnancement du processus de conception des solutions,
- la conception générale des solutions,
- l'évaluation des solutions proposées,
- la sélection de la solution à définir,

3.2.1 *Ordonnancement du processus de résolution : ordonnancement du processus de conception des solutions*

Afin d'apporter une réponse en adéquation avec les caractéristiques du problème posé par la demande de configuration, il convient de :

- adapter le processus de résolution aux caractéristiques de la modification,
- définir les plannings de conception et allouer des acteurs à chacune des tâches,
- définir les indicateurs qui permettront au gestionnaire de configuration de superviser l'avancement du processus.

Ces différents points sont synthétisés dans le Tableau 32 et plus longuement détaillés dans les sections qui suivent.

Objectifs de l'activité	▪ Ordonnancer le processus de conception des solutions ▪ Définir les moyens de supervision.
Acteurs impliqués	▪ Gestionnaire de configuration de l'ensemble concerné.
Informations en entrée	▪ L'ensemble des informations disponibles lors de l'ouverture de la modification.
Informations en sortie	▪ Un processus de conception adapté aux caractéristiques de la demande. ▪ Des plannings de conception prévisionnels. ▪ Les ressources (acteurs métiers) allouées à chacune des tâches du processus.

Tableau 32 : Ordonnancement du processus de résolution

3.2.1.1 Adaptation du processus de résolution aux caractéristiques de la demande

Le processus de résolution mis en œuvre doit être le reflet d'une stratégie de traitement efficace élaborée en fonction des caractéristiques de la demande de modification et du contexte dans lequel elle est émise. Pour que cette opération soit possible, il est nécessaire d'établir une typologie des demandes de modifications (basée sur leurs caractéristiques et leurs contextes d'émission) qui, confrontée par le gestionnaire de configuration à une bibliothèque de stratégies, permettra de définir le processus de traitement à mettre en œuvre.

A- Typologie des demandes de modification

Une demande de modification peut être typée selon ses caractéristiques ainsi que par le contexte dans lequel elle est émise. Parmi les caractéristiques d'une demande, nous identifions :

- son origine (une compagnie aérienne, un organisme de certification, des partenaires ou des sous-traitants, des acteurs de l'organisation ou encore le programme),
- le système impacté et ses éventuelles répercussions (sous la responsabilité de l'émetteur, sous la responsabilité d'un autre partenaire, sous la responsabilité d'un sous-traitant),
- l'impact sur la certification du produit,
- son objet (correction d'une anomalie, amélioration continue du produit ou introduction d'une nouvelle option)
- son urgence (définition de la solution à apporter avant la production de l'appareil, introduction de la modification avant le premier vol ou avant l'entrée en service de l'appareil).

De la même manière, il est possible de définir le contexte d'émission de la demande :

- l'existence d'enjeux commerciaux associés à la demande lorsqu'elle émane d'une compagnie cliente,
- la phase du cycle de vie pendant laquelle la demande est émise par rapport à son urgence (dans ces travaux nous ne prenons en compte que les demandes de modification émises durant les phases de développement d'un nouvel appareil).

Le typage de la demande est effectué par le gestionnaire de configuration sur la base des informations transmises lors des phases précédentes.

B- Bibliothèques de stratégies et processus associés

A chaque type de demande doit correspondre une stratégie à laquelle est associé le squelette d'un processus de conception des solutions qui pourra ensuite être adapté et enrichi par le gestionnaire de configuration. Une stratégie peut toutefois être valable pour plusieurs types de modifications.

Une stratégie établit, au niveau organisationnel, les objectifs (selon le triptyque coûts, délais et performance) que devra atteindre le processus de traitement et, plus précisément le processus de conception des solutions techniques. D'un point de vue opérationnel, chaque stratégie se traduit par une proposition de « squelette » de processus de traitement pouvant être adapté et enrichi par le gestionnaire de configuration. Ce « squelette » décrit les activités de conception principales qui devront être réalisées ainsi que leurs enchaînements. Les activités sont basées sur le cycle de développement traditionnel de l'avion et, par conséquent, doivent être adaptées aux résultats déjà obtenus lors du déclenchement de cette phase. De plus, à ce stade, ces activités sont génériques dans le sens où aucune ressource n'est allouée à la réalisation et qu'aucun planning n'est fixé.

Les mécanismes de création et de gestion des stratégies seront abordés dans le chapitre 5.

3.2.1.2 Plannings de conception et allocation des ressources

Une fois le « squelette » de processus adapté à la modification à traiter est disponible, un planning peut être établi et des ressources allouées à chacune des activités en vue de leur réalisation.

La définition des plannings est établie en fonction :

- du planning de développement initial,
- de l'estimation des temps nécessaires à la réalisation de chaque activité,
- et enfin de la durée allouée pour le traitement de la modification.

Le respect du planning établi dépend en grande partie de la disponibilité des acteurs auxquels les tâches sont confiées. Les acteurs sollicités pour le développement d'une solution dans le cadre du traitement d'une modification sont généralement les mêmes que ceux impliqués dans le développement initial du produit. La gestion de la disponibilité des acteurs dans les processus de développement est une problématique qui peut être abordée de plusieurs points de vue lorsque l'on s'intéresse à la gestion des modifications. Il est possible de considérer que le gestionnaire de configuration doit confier une tâche à un acteur selon sa disponibilité dans le processus de développement. Dans ce cas, il est supposé que la disponibilité des acteurs est connue. Au contraire, il est possible de considérer que l'implication des acteurs est régie par un contrat passé entre les gestionnaires de configuration et les équipes de développement et que, par conséquent, la disponibilité des acteurs ne doit pas être prise en compte par les gestionnaires de configuration. Ce second point de vue est celui adopté dans le cadre de ces travaux.

A l'issue de cette phase, et en fonction des objectifs associés à la demande, le gestionnaire de configuration a en sa possession un processus adapté à la demande de modification auquel sont associés des plannings ainsi que des acteurs pour la réalisation de chacune des tâches.

3.2.1.3 Indicateurs et supervision de la conception

Mais, si aucun indicateur n'est associé au processus mis en œuvre, il devient impossible pour le gestionnaire de configuration de superviser le processus par rapport aux objectifs fixés et selon la stratégie adoptée. Il convient donc d'associer à chaque stratégie (et au « squelette » de processus), un ensemble d'indicateurs reflétant l'état courant du processus de traitement.

Pour être pertinents, les indicateurs doivent être adaptés à la stratégie de traitement sélectionnée. Ainsi, lorsqu'une demande doit être traitée dans l'urgence, les indicateurs d'avancement seront privilégiés. Lorsque la demande concerne l'introduction d'une option dans le catalogue du constructeur à plus long terme, les indicateurs économiques seront alors mis en avant. Le but de ces indicateurs est de mettre à disposition du gestionnaire de configuration, les moyens de contrôle d'éventuelles déviations du traitement. La définition de ces indicateurs est plus longuement détaillée dans [RIV03].

Pour une détection efficace des déviations, la seule mise en place d'indicateurs ne suffit pas, il est nécessaire que :

- les acteurs impliqués dans le processus de traitement mettent à jour régulièrement les indicateurs associés à la réalisation de leurs activités,
- le gestionnaire dispose d'un moyen de synthèse sur l'état courant des différents indicateurs,
- des actions correctives soient associées à chaque tendance négative des indicateurs.

A l'issue de la phase d'ordonnancement, la résolution proprement dite du problème peut débuter sur la base des premiers concepts élaborés et validés.

3.2.2 Résolution du problème : conception générale des solutions

La conception générale des solutions correspond à l'exécution du processus ordonné lors de la phase précédente. Elle est donc réalisée par les acteurs qui ont été assignés à l'exécution des différentes tâches. Le résultat est donc la conception générale des différentes alternatives de solutions sur la base des concepts initialement proposés. La documentation de ces alternatives est comparable à celle générée lors de la conception générale d'une solution « ordinaire » (Cf. partie 4 du chapitre 1) si ce n'est qu'elle est enrichi par leur impact sur la configuration courante du produit.

Objectifs de l'activité	▪ Concevoir les solutions proposées sous la forme de concepts
Acteurs impliqués	▪ Acteurs Métiers. ▪ Gestionnaire de configuration de l'ensemble concerné.
Informations en entrée	▪ Un processus de conception ordonné. ▪ Les concepts de solutions.
Informations en sortie	▪ La conception générale des solutions et la documentation associée.

Tableau 33 : Résolution du problème

Puisque cette phase ne constitue que l'exécution d'un processus, la méthode n'apporte ici qu'une préconisation : les acteurs devraient avoir uniquement accès aux informations pertinentes pour l'exécution des tâches qui leurs ont été confiées (Faciliter l'accès « à la bonne information au bon moment pour le bon acteur »). Au cours de la réalisation de cette phase, les informations considérées comme pertinentes sont :

- les informations relatives au système en cours de modification, c'est-à-dire la documentation de ses différentes configurations courantes ou de références,
- les informations relatives au processus de traitement lui-même afin que les acteurs aient une vision de leur position dans le processus et prennent en compte les résultats d'autres tâches dans la réalisation de leurs activités. Mais aussi la mise en forme et la transmission des informations,
- les informations relatives aux procédures de référence de l'organisation, utilisées comme manuel métiers lors du développement.

Au cours de cette phase, la réalisation des différentes tâches est enregistrée et analysée par le gestionnaire afin de tenir à jour les différents indicateurs.

3.2.3 *Evaluation des réponses apportées au problème : évaluation des solutions proposées*

Afin de répondre à la demande initiale, une solution technique doit être sélectionnée parmi les alternatives étudiées. La sélection est réalisée par le Comité de Contrôle de la Configuration (CCC). Mais pour qu'une décision soit arrêtée, chaque alternative doit être évaluée par rapport aux autres mais aussi par rapport à la solution existante, afin que le CCC bénéficie d'une vue globale de la modification (en termes d'alternatives proposées) et de ses implications. Deux types d'évaluations sont proposés dans le cadre de cette méthode : la première est l'analyse des répercussions possibles de chaque solution (analyse semblable à l'analyse d'impacts décrite dans la partie 3.1.2.1) tandis que la seconde vise à étudier l'influence de chaque alternative sur les performances du produit, son exploitation et enfin sur son implémentation.

Objectifs de l'activité	▪ Fournir une évaluation des alternatives étudiées.
Acteurs impliqués	▪ Acteurs Métiers. ▪ Gestionnaire de configuration de l'ensemble concerné.
Informations en entrée	▪ La conception générale des solutions et la documentation associée.
Informations en sortie	▪ Analyse des répercussions techniques de chaque alternative. ▪ Analyse de l'influence des modifications sur les performances du produit, son exploitation future et son implémentation.

Tableau 34: Evaluations des solutions proposées

3.2.3.1 *Analyses d'impacts des solutions proposées*

Si la méthode d'analyse d'impact d'une modification permet de détecter ses éventuelles propagations vers d'autres composants ou systèmes du produit, elle peut également être utilisée pour déterminer les répercussions des solutions techniques étudiées. Par conséquent, à un stade plus avancé du processus de traitement, lorsque plus d'informations sont disponibles, elle peut être utilisée pour confirmer les impacts éventuels soulignés lors de la première analyse ou pour entrevoir de nouvelles répercussions. Ainsi, il devient possible d'examiner si l'implémentation d'une des alternatives implique l'étude d'autres modifications.

Dans la pratique, l'analyse de ces répercussions est réalisée de la même manière que pour l'analyse d'impacts. Toutefois, l'analyse des répercussions ne permet pas d'évaluer dans le détail les apports et les limitations de chaque alternative proposée dans le but de mettre en évidence la plus acceptable d'entre-elles.

3.2.3.2 Evaluation des solutions

Afin de positionner les différentes alternatives les unes par rapport aux autres, une méthode d'évaluation est proposée dans le cadre de la méthode. Plutôt que d'analyser les qualités techniques de chaque solution, cette méthode vise à démontrer l'influence de chacune des solutions techniques proposées sur les performances du produit, sur son exploitation et enfin sur les facteurs liés à son implémentation. Ici, la comparaison porte sur les apports et les limitations de chaque alternative proposée par rapport à un produit intégrant la solution technique initiale.

A- Critères pris en compte pour l'évaluation des solutions

Les trois critères proposés pour réaliser cette évaluation sont :

- l'influence de la solution sur les performances du produit. Ce critère concerne principalement les métiers d'ingénierie ainsi que le programme qui doit vérifier si les performances du produit ne sont pas dégradées.
- l'influence de la solution sur l'exploitation du produit. Ce critère concerne principalement les métiers de support et de maintenance qui devront garantir aux compagnies les performances d'exploitation du produit si la solution est retenue.
- l'estimation des écarts de coûts et délais ainsi que des risques associés à l'implémentation de la nouvelle solution par rapport à la première.

Ces critères ne constituent qu'une agrégation des sous-critères définis par le Tableau 35.

PRODUCT PERFORMANCES Weights Aerodynamics Impacts Aeroelastics Impacts Engine Thrust Payload /Range Impacts Internal / External Noise Engines Specific Fuel Consumption Testings (Dev. & Serial Issues) Stress Static / Fatigue Reparability Supportability Engineering Interchangeability MTBUR / MTBF Maturity Reliability Energies Consumption Environmental Impact Airport Compatibility Mixability	PRODUCT EXPLOITATION Reliability Standardisation Accessibility Inspectability Reparability Maintainability Corrosion	INTRODUCTION COSTS RECURRENT COSTS Labour delta, Material delta, Transport Delta, Customisation Delta, Support tools Delta, Retrofit Delta, Procurement Delta NON RECURRENT COSTS Non Specific Design Work Delta, Specific Design Work Delta, Development Tests Delta, Qualification/Map Delta, Jigs and Tools Delta, Manufacturing Engineering Delta, Transport Tools Delta, Investments Delta, Technical Documentation Delta, Training Delta, Support Tools Delta, Retrofit Delta RISKS Certification, Customer Acceptance LEAD TIMES Development, Series
---	--	--

Tableau 35 : Critères considérés lors de l'évaluation des solutions

B- Méthode d'évaluation

La méthode d'évaluation proposée repose sur la participation des acteurs impliqués dans la conception des différentes alternatives. Lors de la clôture de l'activité qui lui

était assignée, l'acteur doit estimer, lorsque cela est possible, l'influence de l'alternative sur chacun des critères. L'estimation est réalisée en fonction de l'échelle suivante :

- très défavorable (0, à ne pas confondre avec une influence nulle),
- peu favorable (1),
- équivalent (2),
- favorable (3),
- très favorable (4).

Lors de l'évaluation finale, l'ensemble des évaluations réalisées par chacun des acteurs et pour chacune des alternatives est disponible. Il est alors possible d'effectuer la moyenne des estimations pour chacun des critères puis de les agréger selon les trois critères principaux (performances du produit, exploitation du produit et implémentation). Mais cette opération ne reflète pas la prédominance de certains critères sur d'autres. En effet, selon le contexte de l'étude et les objectifs du traitement, certains critères peuvent sciemment ne pas être pris en compte tandis que d'autres revêtent une d'importance supérieure. Des poids peuvent être associés aux critères afin d'effectuer des moyennes pondérées qui sont ensuite intégrées aux critères de niveaux supérieurs.

Ainsi, pour chacun des critères et des sous-critères qui les composent, le questionnaire de configuration est en mesure :

- de présenter une évaluation basée sur les moyennes des avis exprimés par les acteurs impliqués dans la conception,
- de présenter une évaluation basée sur la moyenne pondérée des avis exprimés par les acteurs impliqués dans la conception (poids fixes),
- de réaliser des simulations d'évaluations en utilisant les poids comme des variables de simulation (poids variables).

La qualité des évaluations dépend en grande partie de la capture de l'avis des acteurs, ce qui peut constituer une des limitations de cette méthode (Cf. partie 4)

C- Exploitation des résultats de l'évaluation

Les résultats de l'évaluation sont principalement destinés au Comité de Contrôle de la Configuration en vue d'une prise de décision. Ils doivent donc être présentés de manière claire et synthétique afin de faire apparaître :

- les avantages et les inconvénients de chacune des alternatives,
- le positionnement des alternatives les unes par rapport aux autres selon les trois critères proposés.

Par conséquent, ce sont des représentations graphiques des évaluations qui sont proposées au Comité de Contrôle de la Configuration comme le montre la Figure 41.

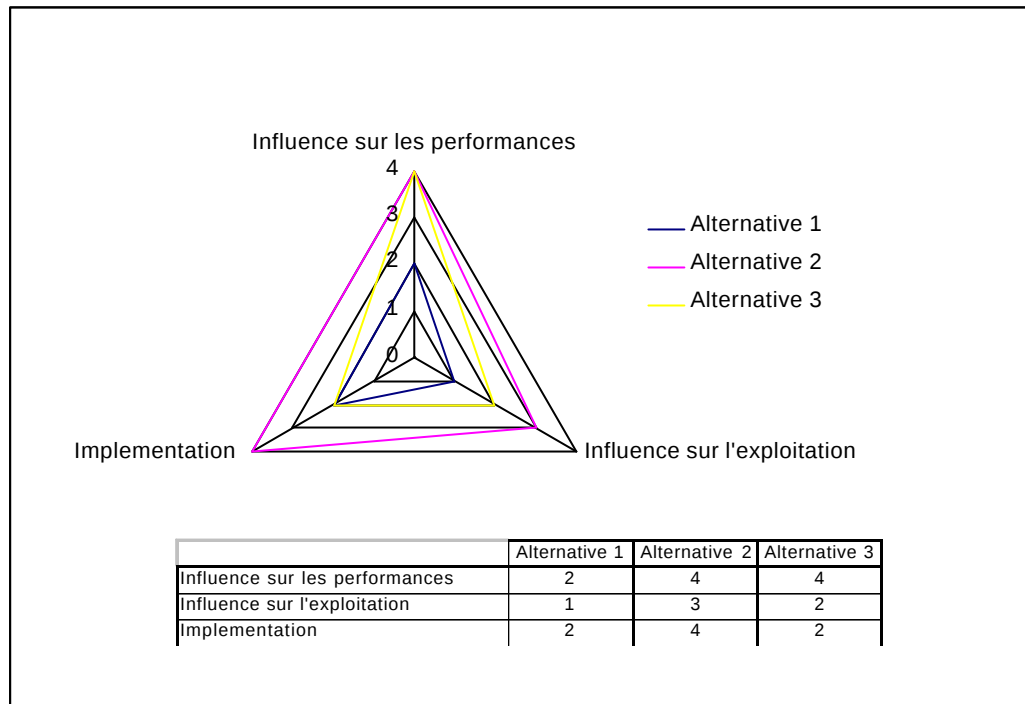


Figure 41 : Positionnement des alternatives selon les trois critères proposés

3.2.4 Sélection de la solution à définir

A partir de la documentation associée à chacune des solutions alternatives conçues et sur la base des évaluations fournies par le gestionnaire, le Comité de Contrôle de Configuration sélectionne une solution qui sera ensuite définie avant d'être implantée physiquement sur le produit lors des phases de conception et d'assemblage.

Objectifs de l'activité	▪ Sélectionner une solution parmi les alternatives proposées.
Acteurs impliqués	▪ Comité de Contrôle de la Configuration.
Informations en entrée	▪ La documentation associée à la demande de modification. ▪ La documentation de conception associée à chacune des solutions alternatives proposées. ▪ Analyse des répercussions techniques de chaque alternative. ▪ Analyse de l'influence des modifications sur les performances du produit, son exploitation future et son implémentation
Informations en sortie	▪ Une solution sélectionnée parmi les alternatives proposées

Tableau 36 : Sélection de la solution à définir

La sélection d'une solution est le résultat d'une confrontation de points de vue et d'une négociation entre les différents membres du comité, représentant les différents métiers impliqués dans le cycle de vie du produit. La solution sélectionnée peut ne pas être la solution optimale, mais la plus acceptable par l'ensemble des parties. Si le comité juge qu'un complément d'information est nécessaire afin de prendre une décision de manière éclairée, alors, un rebouclage avec la phase de conception générale peut être demandé. Dans tous les cas, la décision arrêtée par le comité sera communiquée aux acteurs qui seront ensuite impliqués dans la phase de définition de la solution.

3.3 Définition de la solution

Le but de la cette phase est de faire converger la solution sélectionnée, issue de la phase de conception générale vers la définition plus mature du produit. La définition d'une solution lors du traitement d'une modification est donc semblable à la définition initiale des solutions, se déroulant entre les jalons M5 et M7 du cycle de vie du produit. Cette phase vise donc à produire (création ou modification de la documentation existante) la documentation de définition associée à ces jalons.

Puisque ces travaux se limitent à la phase de développement d'un nouvel avion, le processus de traitement d'une modification se clôture par cette phase. Toutefois, avant de clôturer le processus, un certain nombre d'informations spécifiques au traitement doivent être sauvegardées en vue d'une future réutilisation (Cf. 3.3.2).

3.3.1 Conception détaillée de la solution

La phase de conception détaillée de la solution sélectionnée, aussi appelée phase de définition, vise à établir la documentation permettant son implémentation. C'est à dire sa fabrication et son assemblage lorsqu'elle implique des éléments physiques et le développement du code lorsqu'il s'agit de développement logiciel. Au-delà de la simple implantation, cette phase doit également prendre en compte les exigences de soutien liées à des phases d'exploitation du produit c'est à dire la maintenance et le maintien en conditions opérationnelles des appareils.

La phase de conception détaillée est intrinsèquement liée à la documentation du produit, qu'il s'agisse de sa création ou de sa mise à jour qui fait alors appel à des mécanismes de versionnement.

Objectifs de l'activité	▪ Permettre l'implantation de la solution (fabrication et assemblage) et son soutien ▪ Intégrer la solution dans la définition existante du produit.
Acteurs impliqués	▪ Acteurs Métiers ▪ Gestionnaire de configuration de l'ensemble concerné
Informations en entrée	▪ La documentation de conception associée à chacune des solutions alternatives proposées. ▪ Analyse des répercussions techniques de chaque alternative. ▪ Analyse de l'influence des modifications sur les performances du produit, son exploitation future et son implémentation
Informations en sortie	▪ Documentation de définition validée (après création ou modification) ▪ Mise à jour des liens du modèle produit.

Tableau 37 : Conception détaillée de la solution

Pour que la conception détaillée soit considérée comme terminée, les composantes du dossier de définition doivent être mises à jour, de même que les différentes maquettes décrivant le produit (Cf. Chapitre 1) ainsi que les liens du modèle produit. De telles mises à jour, lorsqu'elles n'impliquent pas la création de nouveaux documents, conduisent à modifier les documents existants. La modification d'un document implique l'évolution de son indice de versionnement ou son amendement. Quel que soit le mécanisme employé, le but du gestionnaire de configuration est de connaître la documentation à jour de la définition du produit et d'associer les versions de la documentation aux exemplaires du produit.

Mais si la préparation de la fabrication est démarrée alors la documentation de définition ne sera pas la seule impactée. Ainsi, les plannings de fabrication, l'approvisionnement, l'ordonnancement des séquences d'assemblage et les séquences de tests peuvent être également revus selon les contraintes introduites par la solution tout en prenant compte des plannings de livraison. Cette problématique du suivi des modifications et de l'introduction des solutions au-delà de la phase de développement, même si elle est primordiale, se situe au-delà du périmètre de ces travaux.

La documentation de définition est validée lorsqu'elle est jugée conforme aux exigences et aux spécifications établies par les acteurs concernés. C'est donc le processus de validation traditionnellement employé lors des phases de définitions initiales. Mais cette validation ne clôture pas le processus.

3.3.2 Archivage du problème, du processus de résolution et de la solution

Lors du traitement des modifications, les acteurs utilisent souvent des raisonnements par analogies à partir de cas déjà traités. Ces mécanismes permettent d'identifier les similarités entre des problèmes à traiter et ceux pour lesquels une solution a déjà été apportée. Lorsqu'une analogie est découverte, les acteurs peuvent réutiliser certaines informations mais aussi consolider leurs résultats. La sauvegarde d'un traitement est donc primordiale. S'il n'est pas réutilisé dans le futur pour établir des analogies, il permet de conserver le contexte de création d'une solution et sa logique de conception mais aussi d'assurer une conservation de l'historique du système remis en cause (exigence de traçabilité).

Objectifs de l'activité	▪ Sauvegarder les informations liées au traitement d'une demande de modification
Acteurs impliqués	▪ Gestionnaire de configuration de l'ensemble concerné
Informations en entrée	▪ Les informations manipulées et générées au cours des trois phases majeures du processus de traitement
Informations en sortie	▪ La conservation des informations principales liées au processus de traitement d'une demande de modification ▪ La traçabilité de conception d'une solution technique

Tableau 38 : Archivage du problème, du processus de résolution et de la solution

S'il convient de conserver les informations manipulées et générées lors du traitement d'une demande de modification, il n'est pas pertinent de toutes les prendre en compte. En effet, la conservation dépend des besoins de réutilisation et des exigences de traçabilité. Ainsi, il convient de conserver les informations suivantes (sans prise en compte ici du format de sauvegarde) :

- la demande de modification initiale et son périmètre associé (composants susceptibles d'être impactés et équipes susceptibles d'être affectées),
- Les principes des différentes alternatives de solutions envisagées,
- La stratégie choisie, le processus de traitement mis en œuvre et la synthèse des principaux indicateurs,
- Les objectifs assignés au traitement (coût, délai, qualité),
- Les analyses des répercussions des solutions proposées
- L'évaluation de chacune des alternatives proposées,
- Les décisions prises au cours du traitement,
- La solution sélectionnée et sa documentation de définition.

Toutefois, pour qu'une réutilisation soit pertinente, il convient de confronter certaines des informations sauvegardées avec les résultats effectivement obtenus dans la réalité. C'est le cas des analyses d'impacts et des évaluations pour lesquelles des facteurs de confiance peuvent être associés aux résultats.

De plus, la structuration des informations dépendra en grande partie des moyens et des dispositifs de réutilisation envisagés. Cette phase concerne la mise en place de la méthode dans une application informatique et ces aspects sont détaillés dans le chapitre 5.

A l'issue de cette phase, le processus de traitement d'une modification peut être considéré comme clos.

4 Evaluation de la méthode

La méthode de traitement proposée ci-dessus permet d'apporter une solution technique aux demandes de modifications émises lors du développement de produits aéronautiques en ingénierie concourante. Elle présente des avantages mais aussi des limitations qu'il est, à ce stade, important de mesurer.

4.1 Positionnement de la méthode par rapport à la cartographie du besoin

Par rapport à la cartographie proposée dans le chapitre 3, le Tableau 39 ci-dessous permet de positionner les avantages et les limitations de la méthode par rapport au besoin exprimé.

BESOINS	APPORTS
Adapter le processus de traitement aux types de modifications à traiter	+
Faciliter l'accès aux informations lors du traitement d'une modification	+/-
Analyser l'impact des modifications et des solutions	+
Piloter et contrôler le processus de traitement	+/-
Supporter les prises de décisions	+
Mettre en place des dispositifs de collaboration dans le processus.	-
Permettre la réutilisation des informations générées	+
S'assurer de l'intégrité fonctionnelle du produit	+
Adapter le processus de traitement à la configuration de l'organisation	+
S'assurer de la traçabilité des informations générées au cours du traitement en vue de la certification du produit	+/-

Tableau 39 : Adéquation de la proposition avec le besoin

D'un point de vue méthodologique, les trois avantages principaux apportés par la méthode proposée sont :

- une démarche d'analyse d'impacts des demandes de modifications et de répercussions des solutions conçues,
- l'adaptation des processus de traitement aux caractéristiques de la demande à traiter mais aussi à l'organisation au travers de la mise en place d'une stratégie,

- l'évaluation des solutions venant supporter la sélection d'une solution par le comité de contrôle de la configuration.

En l'état, les concepts liés au pilotage et à la supervision du processus de traitement ne peuvent pas être considérés comme matures. Ils devront être développés plus en détail afin que leurs implémentations constituent une réelle valeur ajoutée pour le traitement. En effet, pour être pertinents, la granularité des indicateurs doit être adaptées aux objectifs à contrôler et leurs évolutions doivent refléter la réalité du traitement sans pour autant « alourdir » les activités des acteurs impliqués. La définition de tableaux de bord pertinents pour les gestionnaires de configuration constitue également, à ce jour, une limitation importante devant être levée.

Au travers de la description de la méthode, les besoins liés à l'accès aux informations ainsi qu'aux dispositifs de collaboration, ne semblent pas être comblés. Une réponse, dépendante de la mise en œuvre informatique de cette proposition est fournie dans le chapitre 5 au travers du démonstrateur CM-EC (« Collaborative Management of Engineering Changes »).

4.2 Impacts sur l'organisation

A partir de la description de cette méthode, les impacts associés à cette proposition et à sa mise en œuvre dans une organisation industrielle doivent être soulignés. La proposition ne suppose pas la création de nouveaux rôles au sein des processus de gestion des modifications mais appelle à l'enrichissement des activités qui leur sont associées.

Pour les acteurs impliqués dans le processus, au-delà des activités qui leur incombent traditionnellement, la méthode les astreint à participer à l'analyse et à l'évaluation des solutions mais aussi à enrichir les indicateurs d'avancement. Ces tâches constituent donc pour eux une charge supplémentaire. Toutefois, cette « surcharge » apporte les informations nécessaires pour la mise en place d'une supervision efficace du processus de traitement par les gestionnaires de configuration mais également un support à la décision pour les comités de contrôle de la configuration. Selon les cas d'étude, la surcharge doit donc être évaluée à la lumière des apports introduits par la proposition dans le processus de gestion des modifications.

4.3 Impacts sur les processus de gestion de configuration

La proposition vise à considérer le processus de traitement des modifications comme un réel projet d'ingénierie. Elle se concentre donc sur :

- la structuration des activités et de leurs enchaînements,
- l'introduction de techniques d'aide à la décision (analyse d'impacts des modifications, évaluation des solutions),
- la définition de stratégies de traitement et d'objectifs à réaliser,
- la mise en place de moyens de supervision du processus,
- l'utilisation optimale des ressources dédiées au processus.

Cette proposition répond aux règles édictées par les normes de gestion de configuration et étend plus loin les préconisations relatives à la gestion des modifications afin

d'améliorer la réactivité de l'organisation aux sollicitations tant internes qu'externes mais aussi les répercussions de chaque traitement.

4.4 Impacts sur la modélisation du produit

Un volet de la proposition est dédié à la description d'une démarche visant à guider les acteurs dans l'investigation des répercussions possibles d'une demande de modification puis des solutions qui y sont apportées.

Cette démarche repose sur la définition d'une typologie de liens entre composants enrichissant le modèle produit initial. L'introduction de cette méthode implique donc une modification du modèle produit manipulé au cours des phases de développement afin d'introduire quatre nouveaux types de liens. Ainsi, au cours de la conception, lorsque le modèle est renseigné, les concepteurs doivent prendre en compte l'existence de ces liens à chaque introduction de nouvel item. Au-delà de la surcharge induite par la création de nouveaux liens entre composants, c'est la maintenance de ces liens, en fonction de l'évolution du produit, qui peut devenir coûteuse et créer une surcharge pour les concepteurs. De plus, la profusion de liens ou une mauvaise maintenance de ceux-ci peut altérer les performances de l'activité de gestion de configuration dans le temps et, par voie de conséquence, l'intégrité du produit.

5 Vers une mise en œuvre informatique centrée sur la collaboration

La méthode décrite et évaluée ci-dessus est principalement focalisée sur le processus de traitement des modifications. Elle fait clairement apparaître le processus de traitement des modifications comme un exercice collaboratif dans lequel interviennent plusieurs acteurs selon leurs compétences et les rôles qui leur ont été attribués. Pourtant la proposition ne supporte pas directement la collaboration entre les acteurs du processus. Pour permettre ce support, il faut s'orienter vers une mise en œuvre informatique de la proposition et examiner l'apport de concepts tels que les espaces virtuels partagés issus du mode de la TCAO ou Travail Coopératif Assisté par Ordinateur ou TCAO (discipline plus connue dans l'univers anglo-saxon sous le nom de Computer Supported Cooperative Work ou CSCW).

5.1 TCAO ou Travail Coopératif Assisté par Ordinateur

Cette thématique scientifique est apparue dans les années 80 aux Etats-Unis. Elle est par nature interdisciplinaire puisque son développement est dû à la rencontre des sciences sociales et informatiques. Il existe donc plusieurs définitions possibles liées à ce champ d'investigations. Selon la vision sociale : « le TCAO devrait être considérée comme une tentative pour comprendre la nature des caractéristiques du travail coopératif, avec pour objectif la conception de technologies informatiques adéquates » [BAN89]. Une autre vision plus informatique considère le TCAO comme l'ensemble des « systèmes informatiques qui assistent un groupe de personnes engagées dans une tâche (ou un objectif) commune et qui fournissent une interface à un environnement partagé » [ELL91]. Benali et al. dans [BEN02] proposent une définition plus simple et fédératrice. Pour eux, le TCAO « est le domaine qui étudie la conception, la construction et l'utilisation (usages) des systèmes coopératifs. Les systèmes coopératifs sont des systèmes permettant à plusieurs utilisateurs (des acteurs) de travailler via une infrastructure technologique (un réseau de composants matériels) ». Ainsi un collecticiel (également connu sous le nom de groupware dans le monde anglo-saxon) est un type de

logiciel particulier qui entre dans la mise en œuvre d'un système coopératif ou, plus largement, est une application de TCAO.

Les collecticiels sont donc des outils logiciels pour le travail collaboratif. Il en existe différents types qui peuvent être classés selon certaines de leurs caractéristiques :

- Temps (synchrone vs asynchrone) ; distance (locale vs distribuée) ; taille du groupe,
- Dimension partage vs Dimension échange
- Restriction vs Permission
- Production totale vs Communication totale

Mais, au delà de ces caractéristiques souvent liées à l'environnement d'intégration, le spectre des fonctionnalités de ces outils peut être détaillé selon le modèle du trèfle [ELL94] qui fournit un cadre conceptuel pour déterminer les requis fonctionnels d'un collecticiel (Cf. Figure 42).

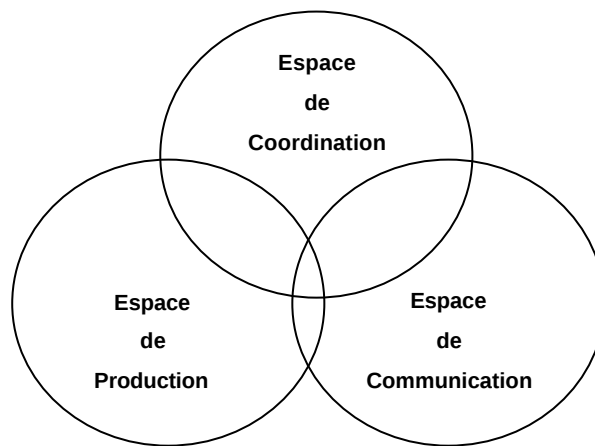


Figure 42 : Trèfle de Ellis [ELL94]

Le trèfle est composé de différents espaces :

- **L'espace de production** concerne l'ensemble des fonctionnalités de production ou de mise en évolution d'objets qui pourront être partagés.
- **L'espace de communication** correspond aux fonctionnalités permettant l'échange et le partage d'objets entre les acteurs du collecticiel. Cet échange est parfois qualifié de communication homme-homme médiatisée. [SAL95]
- **L'espace de coordination** correspond aux fonctionnalités dédiées à l'assignation des tâches et de rôles aux différents acteurs d'une activité collaborative. Ces fonctionnalités ont pour but de coordonner les acteurs et de planifier leurs tâches. C'est donc cet espace qui garantit la cohérence de la réalisation de l'objectif commun.

En marge de ces fonctionnalités, la plupart des collecticiels repose sur trois concepts fondamentaux qu'il est important de souligner. Le premier est celui de fluidité (« seamlessness ») [ISH93], comme par exemple le passage sans difficulté de l'espace privé à l'espace public ou celui de l'application collaborative à une autre application. Le second correspond à la conscience de la présence des autres (« cooperation awareness ») [SCH02b], comme par exemple connaître les modifications apportées par les

autres acteurs. Enfin, le troisième concept est celui du travail articulatoire (« articulation work »), i.e. le sur-travail généré par la coordination du groupe [SCH92].

Au sein d'un processus collaboratif, les collecticiels ont donc pour objectifs de [HOO95]:

- simplifier le partage d'informations,
- améliorer la communication du groupe,
- faciliter la coordination d'activités,
- favoriser la cohésion du groupe,
- motiver l'implication individuelle,
- favoriser l'auto-organisation du groupe.

Ces caractéristiques sont génériques et elles s'appliquent à l'ensemble des collecticiels disponibles (Workflows, mails, etc.). Il est donc nécessaire de dégager ceux qui pourraient supporter un processus collaboratif de traitement des modifications. Les espaces virtuels partagés semblent en partie répondre à ce besoin.

5.2 La concept d'espace virtuel partagé

Un espace virtuel partagé est un environnement de travail géré à partir d'une application informatique et reposant sur un référentiel informationnel commun. Cet environnement supporte la dynamique d'un groupe d'utilisateurs afin d'atteindre l'objectif qui lui a été fixé (fonctionnalités de communication et de coordination) mais aussi chacun d'entre eux dans la réalisation de l'activité qui leur a été assignée (fonctionnalité de production). La représentation des informations dans l'environnement et les actions qui lui sont liées dépendent donc du rôle (ou du profil) de l'utilisateur. Les espaces virtuels partagés mettent en avant deux principes fondamentaux : l'observabilité et la gouvernabilité. L'observabilité est la capacité du système à rendre perceptible à l'utilisateur les informations ou les variables pertinentes pour la tâche à réaliser. La gouvernabilité est la capacité qu'offre le système aux utilisateurs à modifier ou faire évoluer les variables ainsi que les informations. La virtualité de l'espace tient au fait que l'environnement de travail des acteurs est clairement délimité sans pour autant être décrit physiquement puisqu'il s'appuie sur une application ainsi que sur des réseaux informatiques distribués.

Les fonctionnalités associées aux espaces virtuels partagés peuvent être regroupées selon les espaces définis par le trèfle de Ellis (Cf. Figure 42) auquel est ajouté un référentiel informationnel commun.

5.2.1 Un référentiel informationnel commun

Le référentiel commun contient l'ensemble des informations manipulées par les acteurs lors de la réalisation d'une activité participant à la réalisation d'un processus individuel ou collectif. Que l'information soit individuelle ou collective, le référentiel commun doit être structuré afin de faciliter l'accès des acteurs à l'information. L'usage individuel d'une information rendrait ce référentiel, en de nombreux points, similaire à une base de données. Mais, lorsqu'il s'agit d'informations partagées, donc manipulées de manière collective, il devient alors important de considérer l'usage qui en est fait. En effet, les informations doivent être introduites de manière explicite dans le référentiel, c'est à dire extraites du contexte de l'acteur qui les a manipulées puis reformulées d'une manière à ce qu'elles portent un sens pour les acteurs qui y accéderont. Ces acteurs devront ensuite les re-contextualiser selon leurs besoins immédiats. Une même informa-

tion peut donc porter un sens différent pour deux acteurs impliqués dans un même processus collaboratif [SCH92]. C'est pourquoi un référentiel informationnel commun doit :

- être structuré,
- disposer de mécanismes d'accès aux informations de l'espace [gestion des sessions, contrôle de la concurrence des accès, synchronisation, etc.) [LAUR02],
- contenir les informations manipulées dans l'espace,
- contenir (ou fournir un lien vers) les méthodes et pratiques mises en œuvre lors de la manipulation des informations par les différents acteurs.

A partir de ce référentiel commun, il devient donc possible de mettre à disposition des acteurs, des fonctionnalités de production, communication et coordination.

5.2.2 Les fonctionnalités de production

Les fonctionnalités de production recouvrent l'ensemble des mécanismes et des dispositifs permettant aux acteurs de créer, modifier ou manipuler des informations issues du référentiel. Elles peuvent donc varier selon le contexte d'application et selon le type d'activités à mener par l'acteur.

La liaison entre les modules de production de l'espace ou diverses applications liées à l'espace, joue un rôle important dans la fluidité des activités entreprises.

5.2.2.1 Les fonctionnalités de communication

Les mécanismes de communication sont essentiels dans la réalisation collaborative d'activités. Les acteurs utilisent généralement deux mécanismes de communication [MIL93] :

- la communication directe entre acteurs,
- la communication indirecte entre acteurs par l'intermédiaire d'artefacts partagés.

Ces deux modes de communications ne sont pas supportés de la même manière mais ils peuvent toutefois être utilisés simultanément. En effet dans le cadre d'une communication directe, les acteurs peuvent faire référence à des artefacts partagés, également porteurs d'informations. Les modes de communication directe et indirecte peuvent être supportés par les technologies décrites par la Figure 43 :

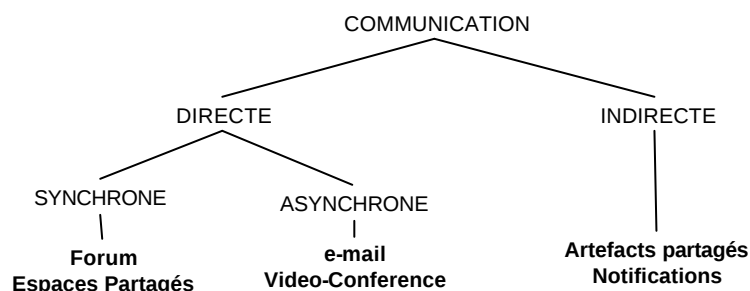


Figure 43 : Technologies supportant les modes de communication directe et indirecte (Adapté de [SCH97])

5.2.2.2 .Les fonctionnalités de coordination

Pour que les acteurs impliqués dans un même projet mais dispersés géographiquement puissent collaborer efficacement, un effort de coordination est alors nécessaire. Il vise à :

- assurer l'organisation de la réalisation des objectifs assignés au projet,
- utiliser au mieux les ressources affectées au projet,
- ordonnancer et piloter de manière logique les différents processus du projet,
- faciliter les interactions entre les acteurs.

Généralement, dans un espace virtuel partagé, cet effort de coordination est associé à un rôle spécifique confié à un acteur (ou à un groupe d'acteurs). Parmi les outils du monde des collecticiels, certains de ces outils participent pleinement à la réalisation des activités de coordination. Les plus connus d'entre eux sont certainement les systèmes workflows qui sont des processus « automatisés » puisqu'ils permettent de faire circuler automatiquement des informations (le plus souvent des documents) entre les acteurs selon les caractéristiques du rôle qui leur a été attribué et, parfois, selon un calendrier préétabli. D'autres outils, comme les calendriers partagés offrent des services de planification des tâches, de gestion de projet et de coordination des membres d'une équipe. Les fonctionnalités usuelles incluent généralement la détection d'incompatibilité dans la planification d'une tâche ou la détermination de plages horaires communes aux membres d'un groupe. Les outils d'aide à la décision présentent également des fonctionnalités d'aides intéressantes pour la coordination des équipes au sein d'un même projet.

6 Conclusions

La proposition décrite dans ce chapitre vise à améliorer les performances du processus de traitement des demandes de modification émises lors du développement d'un nouvel avion.

Elle repose sur le postulat suivant : le problème posé par la demande de modification se construit en même temps que les solutions qui y sont apportées. Pour que ces constructions soient efficaces pour l'organisation, la proposition tend à considérer chaque traitement comme un projet de conception à part entière.

Au-delà d'un processus de traitement structuré et adapté aux besoins des métiers d'ingénierie lors des phases de développement d'un produit aéronautique, la méthode proposée fournit des améliorations locales.

En effet, l'analyse d'impact des modifications est aujourd'hui un sujet incontournable lors du développement de tout produit complexe. La méthode d'analyse proposée dans le cadre de cette étude repose sur l'enrichissement du modèle produit afin que ce dernier intègre les dépendances entre les items qui le composent. Il rend donc possible la mise en place d'une démarche guidant les acteurs dans l'identification des propagations possibles d'une modification. Dans ce sens, la démarche n'est pas prescriptive mais peut être considérée comme une « check-list » à l'attention des acteurs.

A un stade plus avancé du déroulement du processus, une méthode d'évaluation est également proposée. Son but est de positionner les alternatives proposées selon leur influence sur trois critères principaux : les performances du produit, l'exploitation du produit (dans ce cas ce sont les répercussions pour les compagnies clientes qui sont

prises en compte), mais aussi l'implémentation des solutions (c'est à dire les répercussions sur le projet de développement). Le positionnement est réalisé à partir d'une évaluation des acteurs et les résultats sont destinés au comité de contrôle de configuration en vue d'une prise de décision. Comme il le sera montré dans le chapitre 5, des moyens de simulation sont mis à disposition des comités afin d'influer sur les pondérations des critères.

La méthode proposée met l'accent sur la mise en œuvre de processus adaptés aux caractéristiques des demandes à traiter au travers de la définition d'une bibliothèque de stratégies. Cette fonction permet au constructeur de fournir une réponse adaptée aux besoins des clients qu'ils soient internes ou externes.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre se focalise sur la collaboration dans le processus de traitement des modifications en introduisant le concept d'espace virtuel partagé issu du domaine de la TCAO. Ce concept est très étroitement lié au développement d'une application informatique, baptisée CM-EC (pour Collaborative Management of Engineering Changes) et détaillée dans le chapitre 5 qui suit.

Chapitre 5

Le démonstrateur CM-EC

1 Introduction

La proposition étudiée dans le chapitre 4 vise à optimiser le processus actuel de traitement des modifications relatives à des produits complexes en cours de développement. Une partie des concepts mis en évidence dans le cadre de cette proposition peut être supportée, voire prendre toute sa dimension, avec le développement d'une application informatique. En outre, le développement d'une application, sur cette base, permet d'illustrer les apports de ces concepts mais aussi leurs limitations en fonction des besoins des utilisateurs et par rapport aux contraintes industrielles liées au déploiement de la proposition.

Dans ce sens, le chapitre 5 a pour objectif de détailler le projet de développement du démonstrateur baptisé **CM-EC** (Collaborative Management of Engineering Changes). Au-delà du projet de développement, ce sont bien sûr les fonctionnalités offertes par CM-EC ainsi que leur évaluation qui nous intéressent ici. Ce chapitre est donc découpé en trois parties.

La première partie est dédiée à la description des concepts fondamentaux sur lesquels repose le démonstrateur CM-EC ainsi qu'à ses spécifications fonctionnelles et techniques. L'architecture du démonstrateur ainsi que les technologies employées pour son développement sont également détaillées.

La seconde partie consiste ensuite à illustrer les fonctionnalités principales de CM-EC et à présenter leurs avantages ainsi que leurs limitations.

Enfin, à partir de cette illustration, une évaluation du démonstrateur CM-EC est proposée. Cette évaluation se décompose en plusieurs niveaux. Au premier niveau, l'évaluation concerne directement le démonstrateur alors qu'au second niveau l'évaluation concerne les concepts proposés dans le cadre de la méthode, à la lumière de leur mise en œuvre dans une application informatique.

2 Le démonstrateur CM-EC

Après avoir détaillé les objectifs liés au développement du démonstrateur CM-EC, le but de cette partie est de présenter le principe sur lequel il repose, l'espace de travail virtuel et partagé, ainsi que ses spécifications fonctionnelles et techniques.

2.1 Objectifs du démonstrateur

Avec le développement du démonstrateur CM-EC, les objectifs visés sont principalement :

- d'illustrer les concepts proposés dans le cadre de notre proposition (Cf. Chapitre 4),
- d'évaluer ces concepts ainsi que leur possible mise en œuvre dans un contexte industriel,
- d'identifier de nouveaux principes de solutions ou de nouvelles fonctionnalités pour le développement de futures applications pour le traitement des modifications (ce sont les perspectives abordées dans le chapitre 6).

In fine, l'illustration de la proposition avec le démonstrateur CM-EC doit également permettre la mise en évidence des limitations actuelles des systèmes PLM pour le traitement des modifications relatives à des systèmes complexes en cours de développement. Ces limitations concernent principalement :

- l'analyse d'impacts des modifications,
- l'accès aisé aux informations relatives au produit ou au processus, pertinentes pour le traitement d'une modification,
- le déclenchement de processus (ou workflows) de traitement adaptés à la nature de la demande et à son contexte d'émission.

Comme certains systèmes PLM, un support à la collaboration entre les acteurs du traitement est fourni avec le démonstrateur CM-EC. Il repose sur le concept d'espace virtuel partagé.

2.2 Le principe d'espace virtuel partagé dans CM-EC

Dans le monde des espaces virtuels partagés, l'offre commerciale tend à se développer avec la mise sur le marché de logiciels du type Lotus Quickplace³⁷ ou eRoom.³⁸. Si ces logiciels présentent toutes les fonctionnalités génériques décrites dans la section précédente, leurs adaptations aux exigences liées aux processus de traitement des modifications restent problématiques. C'est pourquoi, au-delà des fonctionnalités qui seront discutées dans la partie 2.3, un raffinement de leurs caractéristiques en fonction de ce besoin est maintenant proposée.

Les espaces virtuels partagés mis en œuvre dans le démonstrateur CM-EC intègrent, en plus des caractéristiques génériques, des caractéristiques spécifiques au traitement des demandes de modification.

Ainsi, un espace de traitement est dédié au traitement d'une demande de modification (ou à plusieurs demandes lorsqu'un regroupement est décidé). Il est créé lors de l'enregistrement de la demande et archivé lors de sa clôture. La durée de vie d'un espace est donc celle du traitement de la demande de modification qui lui est associée.

Chaque espace de traitement contient l'ensemble des informations et des opérations nécessaires pour le traitement d'une demande de modification. Pour autant, un espace ne se présente pas de la même manière pour tous les acteurs intervenant dans le trai-

³⁷ <http://www.lotus.com/quickplace/>

³⁸ <http://www.eroom.com>

tement. La présentation des informations et la disponibilité des opérations dépendent du rôle qui est assigné à chaque utilisateur. Cette stratégie facilite l'accès aux informations pertinentes, la navigation dans les menus en prenant en compte les spécificités de chaque rôle tout en garantissant, en partie, la cohérence des actions menées par les utilisateurs.

2.3 Spécifications fonctionnelles du démonstrateur

La définition des spécifications fonctionnelles du démonstrateur permet d'identifier les fonctions que CM-EC devra assurer afin de supporter les utilisateurs dans le traitement des modifications. C'est donc sur les résultats de cette phase que s'appuiera l'effort de développement, une fois les spécifications techniques et l'architecture établies.

Puisque le démonstrateur CM-EC est un collecticiel, il s'appuie sur les requis fonctionnels de ce type d'application définis par Ellis (Cf. Figure 6 du chapitre 4). Ce sont :

- les fonctionnalités de production d'informations,
- les fonctionnalités de coordination des activités et des utilisateurs,
- les fonctionnalités de communication entre utilisateurs de l'espace.

Parallèlement, lors de la description de la proposition au chapitre 4, les besoins opérationnels des utilisateurs ont été remontés (Cf. Renvoi vers Tableau 23). Il est donc possible d'associer chacun des besoins opérationnels à l'un des trois requis fonctionnels des collecticiels afin d'établir les spécifications fonctionnelles du démonstrateur CM-EC en fonction des rôles attribués aux utilisateurs (Cf. Tableau 40).

REQUIS	BESOINS
Production	Faciliter l'accès aux informations lors du traitement d'une modification
	Analyser l'impact des modifications et des solutions
	S'assurer de l'intégrité fonctionnelle du produit
	Permettre la réutilisation des informations
	Supporter les prises de décisions
Coordination	Adapter le processus de traitement aux types de modifications à traiter
	Adapter le processus de traitement à la configuration de l'organisation
	Piloter et contrôler le processus de traitement
	S'assurer de la traçabilité des informations générées en vue de la certification du produit
Communication	Mettre en place des dispositifs de collaboration dans le processus.

Tableau 40 : Association des requis fonctionnels liés aux espaces virtuels partagés avec les besoins opérationnels

Le Tableau 40 montre que les spécifications fonctionnelles du démonstrateur devront principalement se concentrer sur la production d'informations ainsi que sur la coordination des activités et des utilisateurs. Ces deux requis s'adressent respectivement aux utilisateurs appelés « Acteurs » (« Actors ») et à ceux appelés « Gestionnaires de Configuration » (« Configuration Managers »). L'ensemble des rôles définis dans le cadre du démonstrateur CM-EC sont définis dans la section suivante.

2.3.1 Les rôles dans le démonstrateur CM-EC

Dans le démonstrateur CM-EC, quatre rôles peuvent être assignés aux acteurs (Cf. Figure 44)

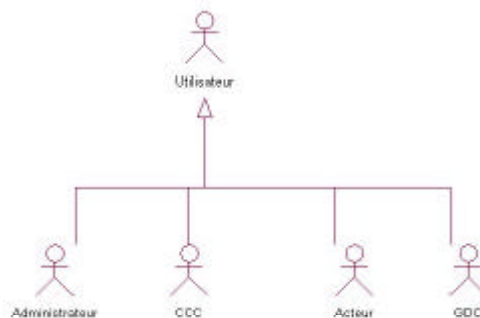


Figure 44 : Les rôles dans le démonstrateur CM-EC

- Les gestionnaires de configuration (GDC ou Configuration Manager) :

Il est associé à un ensemble (ou un sous-ensemble) de la structure produit. Il a pour rôle de maintenir la cohérence de la configuration en s'assurant du bon déroulement du processus de traitement des modifications. Il est en charge de la supervision du processus de traitement, de la demande à l'implantation de la solution.

- Les acteurs métiers (ou Actors) :

Les acteurs métiers peuvent avoir différents rôles et peuvent intervenir à diverses phases du processus s'ils sont sollicités par le gestionnaire de configuration. Il existe trois grandes catégories d'acteurs métiers :

- Les chefs de projets qui sont responsables du projet de conception d'un sous-ensemble de l'avion et donc de son pilotage. Ils s'assurent donc de la réalisation des objectifs convenus en termes de coûts, délais et qualité. A ce titre, ils peuvent donc être amenés à participer au traitement d'une modification.
- Les concepteurs en charge du développement des solutions techniques en réponse à une demande de modification.
- Les analystes qui interviennent pour résoudre des problèmes particuliers (acoustiques, etc.).
- Les spécialistes qui peuvent intervenir à n'importe quelle phase du processus lorsqu'ils sont sollicités par les deux autres catégories d'acteurs ou par le gestionnaire de configuration.

- Les comités de contrôle de la configuration (ou Configuration Control Committee ou CCC) :

Le comité de contrôle de la configuration (représente l'ensemble des entités concernées par le traitement d'une modification) a pour rôle de décider de l'ouverture des modifications et de sélectionner une solution à partir des alternatives évaluées qui lui sont présentées.

- L'administrateur (ou Administrator) :

L'administrateur dispose de l'ensemble des fonctionnalités précédentes associées aux rôles précédents. De plus il peut créer, modifier ou supprimer un utilisateur de l'application et l'associer à l'un des rôles précédents. Il est aussi en charge de l'administration des bases de données (import de la structure produit, définition des processus, archivage, restauration). Son rôle est de garantir la cohérence technique de

l'application du démonstrateur et des bases de données par rapport à son environnement d'utilisation et aux évolutions qui lui sont apportées.

Toutefois, plusieurs rôles peuvent être assignés à un même utilisateur. Ainsi, un gestionnaire de configuration peut également être un administrateur de CM-EC. Des acteurs métier ou des gestionnaires de configuration peuvent également intervenir dans le processus de traitement en tant que membre du CCC.

2.3.2 Les spécifications fonctionnelles du démonstrateur en fonction des rôles

A partir de la définition des rôles dans CM-EC, il devient possible d'établir les spécifications fonctionnelles de l'application pour chacun d'entre eux.

2.3.2.1 Les fonctionnalités liées au rôle d'Administrateur

Dans l'application CM-EC, l'utilisateur auquel est assigné le rôle d'Administrateur doit pouvoir :

- définir et gérer des rôles et des droits d'accès,
- définir et gérer des utilisateurs,
- gérer la base de données Produit (import, maintenance, archivage),
- gérer la base de données Traitement (archivage, maintenance),
- gérer la base de données Processus (archivage, maintenance),
- créer, supprimer et modifier des processus de traitement.

2.3.2.2 Les fonctionnalités liées au rôle de Gestionnaire de Configuration

Dans l'application CM-EC, l'utilisateur auquel est assigné le rôle de Gestionnaire de Configuration doit pouvoir :

- communiquer avec les autres GDC,
- communiquer avec les acteurs,
- communiquer avec le CCC,
- accéder aux traitements en cours,
- accéder aux traitements antérieurs,
- rechercher une modification traitée,
- créer une demande de modification,
- caractériser la demande,
- sélectionner le processus associé à la demande,
- assigner les ressources aux tâches du processus,
- superviser le déroulement du processus,
- ajuster le processus si nécessaire,
- répondre aux utilisateurs si sollicitation,
- mettre à disposition des informations utiles ou nouvelles au cours du traitement,
- réaliser l'évaluation finale des solutions.

2.3.2.3 Les fonctionnalités liées au rôle d'Acteur

Dans l'application CM-EC, l'utilisateur auquel est assigné le rôle d'Acteur doit pouvoir :

- prendre en charge une notification si assignation par le GDC,
- ouvrir un espace de traitement,
- rechercher une modification (en cours ou traitée),
- communiquer avec le GDC responsable du traitement,

- communiquer avec les autres acteurs impliqués dans le processus,
- accéder aux informations produit,
- accéder aux informations liées au processus de traitement,
- mettre à disposition des résultats d'une tâche,
- déclencher le passage à la tâche suivante du processus de traitement,
- évaluer les solutions développées en réponse à une demande de traitement,
- réaliser une analyse d'impact.

2.3.2.4 Les fonctionnalités liées au rôle de Comité de Contrôle de la Configuration

Dans l'application CM-EC, le groupe d'utilisateurs auquel est assigné le rôle de Comité de Contrôle de la Configuration :

- prendre en charge une notification du GDC,
- ouvrir un espace de traitement,
- évaluer la demande de modification,
- décider de sa poursuite,
- mettre à disposition la décision argumentée dans l'espace de traitement,
- informer le GDC de la décision,
- prendre en compte l'évaluation des solutions,
- décider de la faisabilité de la solution choisie,
- mettre à disposition la décision argumentée dans l'espace de traitement,
- informer le GDC de la décision.

Certaines des fonctionnalités évoquées sont communes à plusieurs rôles tandis que d'autres restent spécifiques à un rôle précis. Chacune d'entre elles sera illustrée dans la partie 2.4.1.1 qui détaille l'ensemble des cas d'utilisation pour chaque rôle.

2.4 Spécifications techniques du démonstrateur

A partir des fonctions élémentaires des espaces virtuels partagés, du recueil des besoins opérationnels et des spécifications fonctionnelles, il devient possible d'établir les spécifications techniques détaillées du démonstrateur CM-EC. Les spécifications techniques englobent : les modèles UML³⁹ (diagrammes de classes et cas d'utilisation), l'architecture technique du démonstrateur et les technologies utilisées pour son développement (ces deux derniers points étant définis simultanément) ainsi que les interfaces graphiques .

2.4.1 Les modèles

Les spécifications techniques comprennent principalement deux types de modèles :

- les diagrammes des cas d'utilisations qui représentent les fonctions du système du point de vue de l'utilisateur
- le diagramme de classes qui représente la structure statique de l'application CMEC en terme de classes (les « objets manipulés ») et de relations (association, agrégation, etc.),

³⁹ UML= Unified Modeling Language. UML est un langage de modélisation défini par l'OMG (Object Management Group). Grâce aux différents types de modèles qu'il fédère, UML s'avère particulièrement utile pour le développement d'applications informatiques basées sur des technologies objets. Plus d'informations sont disponibles sur le site : <http://www.uml.org/> .

2.4.1.1 Les cas d'utilisation

Quant à eux, les cas d'utilisation s'attachent à montrer les aspects dynamiques de l'application en se basant sur les points de vue fonctionnels des utilisateurs. Les spécifications fonctionnelles ont montré que certaines fonctions étaient communes à l'ensemble des rôles du démonstrateur. Elles seront regroupées dans le cas d'utilisation des utilisateurs (« USER ») tandis que les autres seront spécifiques à chaque rôle.

- Cas d'utilisation commun à l'ensemble des rôles

Le premier cas d'utilisation commun à l'ensemble des rôles est l'authentification (« login »). Cette fonction doit permettre à chaque utilisateur d'être « reconnu » par le démonstrateur CM-EC (si bien sûr il a été enregistré), et donc de prendre en compte son rôle et les droits qui en découlent.

Un autre cas d'utilisation primordial est le module de communication qui entre dans les requis fonctionnels des outils de travail collaboratif (Cf. Tableau 40). Ce module doit permettre aux acteurs d'échanger des informations relatives à la demande de modification à traiter. Cet échange doit pouvoir se réaliser via les messageries électroniques ou via un forum de discussion du même type. La communication par messagerie électronique est utilisée lorsqu'un acteur, jugeant que son activité est terminée, veut notifier ce fait aux acteurs impliqués dans la (ou les) tâche(s) qui lui succède(nt). Le message est préparé par l'application (référence de l'espace, référence de la tâche et destinataires pré-déterminés) et l'utilisateur peut le compléter avec des commentaires avant de l'envoyer. Les messages correctement envoyés sont sauvegardés dans l'espace de traitement selon la chronologie des envois. En utilisant les forums électroniques associés à chaque espace, l'utilisateur privilégie un cadre de communication moins contraignant. Il peut ainsi échanger librement des informations relatives à la modification de manière informelle avec les autres utilisateurs. Ces échanges sont toutefois sauvegardés de manière chronologique avec l'espace.

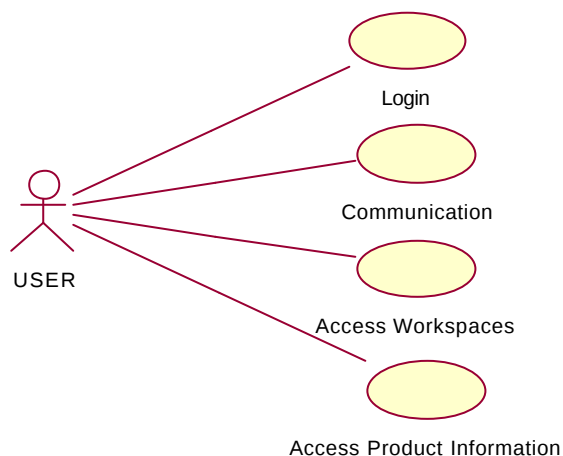


Figure 45 : Cas d'utilisation commun à l'ensemble des rôles

Le module d'accès aux espaces (« Access Workspaces ») permet aux utilisateurs de consulter des espaces archivés ou encore actifs. Par conséquent, ce module doit inté-

grer une fonction de recherche des espaces de traitement selon des critères bien précis (au choix) : identifiant de la demande de modification, titre de la modification, date /ou plages de dates. Les résultats sont présentés sous la forme d'un tableau. Il peut en sélectionner un parmi ceux proposés afin de le visualiser.

Le module d'accès aux informations relatives aux produits (« Access Product Information ») permet aux utilisateurs d'extraire et de visualiser des informations issues des structures produit et, plus particulièrement, les informations relatives aux composants impactés par la demande de modification à traiter.

▪ Cas d'utilisation propre à l'administrateur (« ADMIN »)

Le rôle de l'administrateur consiste essentiellement à gérer les bases de données sur lesquelles repose le démonstrateur CM-EC.

La base de données produit (« Product DB ») comporte l'ensemble des informations relatives à la composition des produits étudiés, c'est-à-dire aux composants qui peuvent être affectés par une demande de modification. Les utilisateurs se réfèrent aux attributs de ces composants ainsi qu'à leur documentation pour exécuter la tâche qui leur a été assignée dans le processus de traitement. L'administrateur doit donc gérer les informations présentes dans ces bases (création, modification, suppression).

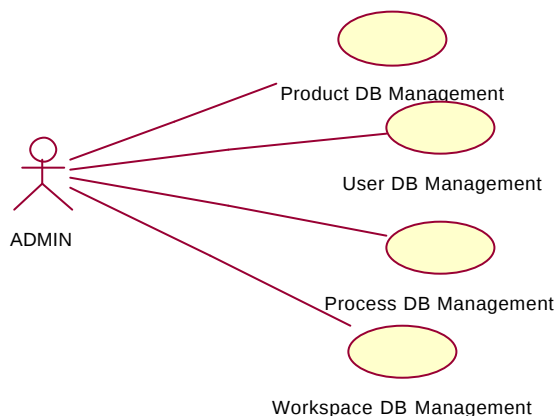


Figure 46 : Cas d'utilisation propre à l'administrateur

De la même manière, il doit également gérer les informations relatives aux utilisateurs ayant accès à l'application ainsi que leurs droits selon leurs rôles. Ces opérations s'effectuent au travers de la gestion de la base de données « User DB ».

Différents processus de traitement sont applicables puisqu'il existe une bibliothèque de processus. Pourtant, celui mis en œuvre lors du traitement d'une demande de modification doit être adapté aux caractéristiques de cette dernière. L'administrateur doit donc gérer la base de données « Process DB » en créant, modifiant et supprimant les processus de traitement dans la bibliothèque.

L'ensemble des espaces de travail sont également contenus dans une base appelée « Workspace DB ». Elle permet à l'administrateur de gérer les espaces informationnels et leurs contenus informationnels qu'ils soient actifs ou déjà archivés. Toutefois, même si le traitement d'une demande de modification est abandonné alors que le processus

n'est pas clos, l'espace correspondant ne peut pas être supprimé. C'est une garantie de traçabilité des modifications débutées qui est ici mise en avant.

- Cas d'utilisation propre au gestionnaire de configuration (« CM »)

Le gestionnaire de configuration est responsable, pour un système précis, du traitement des demandes de modification qui lui sont relatives : de la formalisation de la demande à l'apport d'une solution. De plus, il est responsable de l'enrichissement informationnel d'un ou plusieurs espaces.

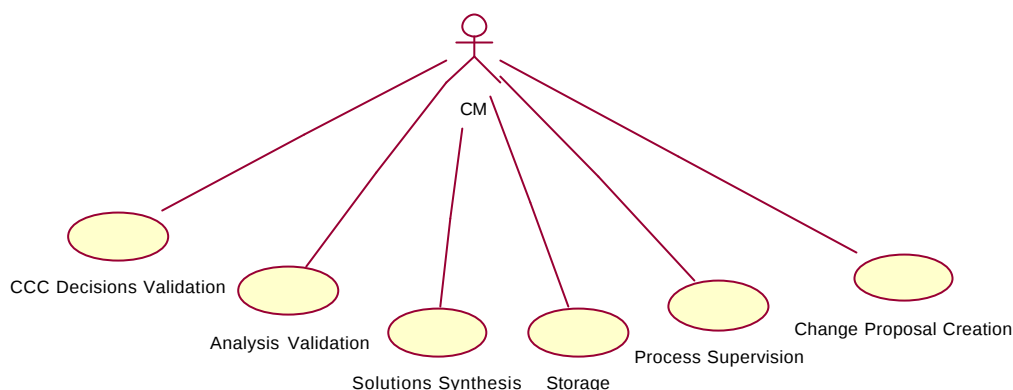


Figure 47 : Cas d'utilisation propre au gestionnaire de configuration

Avec le démonstrateur CMEC, le gestionnaire de configuration doit pouvoir formaliser les demandes de modification soumises en en créant de nouvelles ou en se référant à des demandes antérieures mais non formalisées (« Change Proposal Creation »). Une fois la demande formalisée, il doit pouvoir sélectionner un processus de traitement depuis la bibliothèque, lui affecter des ressources ainsi que des délais de réalisation.

L'application doit également permettre au gestionnaire de configuration de superviser l'avancement du processus de traitement mis en œuvre par rapport au calendrier établi (« Process Supervision »). Des moyens de visualisation ou de rapport sur l'état des différentes tâches du processus doivent donc être disponibles.

Quel que soit le processus de traitement mis en œuvre, des décisions sont nécessaires. Elles sont généralement de deux types et prises par le CCC : la décision de poursuivre le traitement après examen de la demande puis la sélection d'une solution parmi les alternatives proposées. Dans le premier cas, le gestionnaire de configuration consolide et valide l'analyse de la demande effectuée par les acteurs (« Analysis Validation »). Dans le second cas, il fournit, consolide et transmet au CCC les évaluations associées à chacune des alternatives afin qu'il puisse sélectionner une solution (« Solution Synthesis »). De plus, l'ensemble des décisions prises par le CCC doit être validé par le gestionnaire de configuration avant de le rendre visible aux autres utilisateurs de l'espace (« CCC Decisions Validation »).

- Cas d'utilisation propre à l'acteur (« ACTOR »)

Dans le démonstrateur CM-EC, le rôle d'acteur consiste à exécuter les tâches confiées par le gestionnaire de configuration dans le processus de traitement.

Deux types de tâches existent : celles relatives à l'étude de la demande de modification (« Change Proposal Analysis ») puis celles relatives au développement des solutions (« Solutions Development »). Ces tâches sont issues de la méthode de traitement proposée dans le chapitre 4.

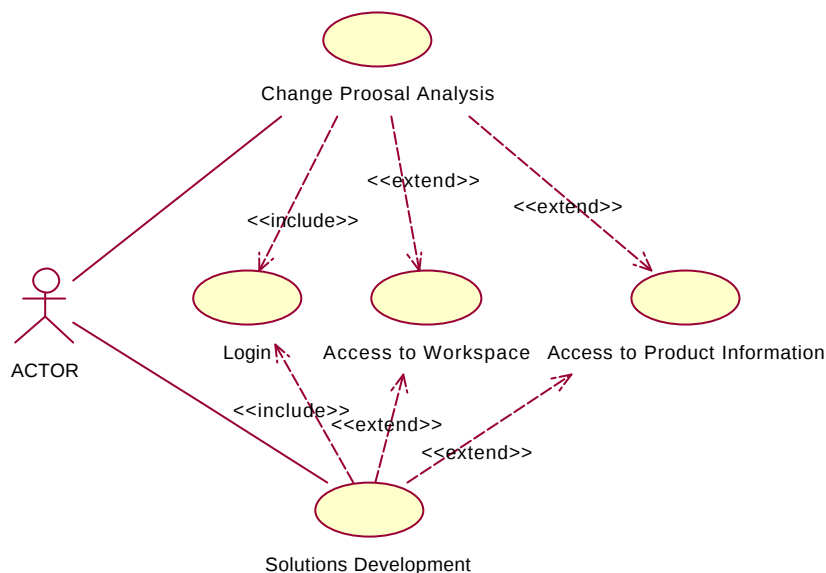


Figure 48 : Cas d'utilisation propre à l'acteur

Dans le premier cas, le démonstrateur doit fournir les modules nécessaires pour évaluer la demande et plus spécifiquement un module d'analyse d'impacts de la demande basé sur l'algorithme proposé dans la partie 3.1.2.1 du chapitre 4. Dans le second cas, c'est un travail de conception et de définition qui est demandé aux acteurs. Lorsque ces solutions sont définies, l'acteur ayant participé à leur élaboration doit les évaluer selon les critères fournis par la méthode d'évaluation proposée dans 3.2.3 du le chapitre 4.

Mais quel que soit le type de tâche confiée par le gestionnaire de configuration, l'acteur doit auparavant accepter de réaliser cette tâche (en fonction d'une évaluation personnelle de sa charge de travail) avant d'engager une action. Une fois que cette tâche est réalisée, il doit pouvoir notifier cet événement aux autres utilisateurs impliqués dans le processus et plus particulièrement aux acteurs à qui la tâche suivante a été confiée. De plus, pour réaliser ces tâches, et en fonction de son profil, l'acteur doit pouvoir se connecter facilement à l'espace de travail et aux informations relatives au produit.

- Cas d'utilisation propre au membre du comité de contrôle de la configuration (« CCC Member »)

Le rôle du CCC consiste essentiellement à prendre des décisions au cours du processus de traitement. Pour cela, chaque membre doit pouvoir se connecter à l'espace de travail afin d'évaluer les demandes de modification pour décider de la poursuite du traitement (« Change Proposal Study in the Light of Modification Opening Decision ») ou consulter les évaluations des solutions développées afin d'en sélectionner une parmi celles proposées (« Proposed Solutions Assessment for Implementation Decision »).

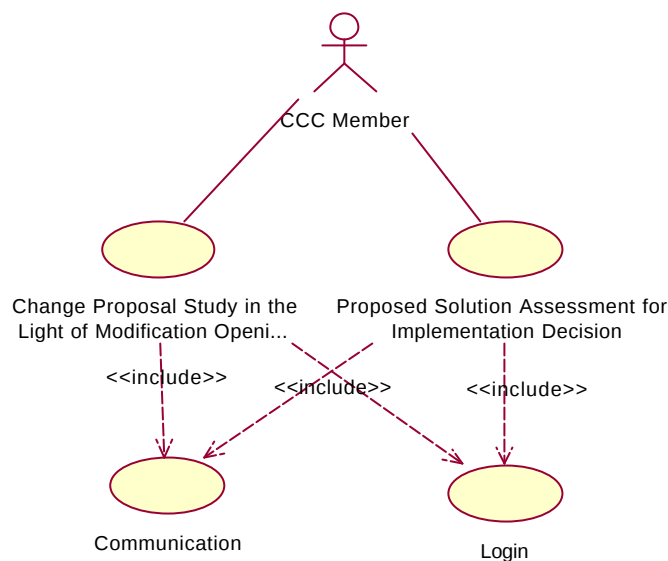


Figure 49 : Cas d'utilisation propre au membre du CCC

2.4.1.2 Le diagramme de classes

Un diagramme de classe simplifié du démonstrateur est disponible en annexe 2 de ce document. Il est simplifié car l'ensemble des attributs et méthodes assignés à chaque classe ne sont pas détaillés. Ici, ce sont les relations entre chaque classe qui nous intéressent.

Ce diagramme montre que les classes disponibles dans l'application CM-EC relèvent ; soit du produit (Cf. Figure 50), soit de l'organisation (Cf. Figure 51) ou se rapportent directement à l'espace virtuel partagé (Cf. Figure 52).

Chaque produit (« PRODUCT ») appelle des composants (« COMPONENT ») de plus bas niveau qui peuvent eux-même en appeler de nouveaux. Un produit est en fait un programme avion identifié par un nom (Long Range, Wide body et Single Aisle, etc) et un identifiant (A318, A319 , A380, etc.). Bien sûr, chaque composant peut être rattaché à plusieurs produits. A chaque composant est rattaché un certain nombre d'attributs de gestion avec notamment l'entité responsable ainsi que la vue à laquelle appartient le composant. Un composant peut normalement être documenté par des fichiers (modèle 2D ou 3D, document textuel, etc..). Les dépendances entre les différents composants du produit (« COMPONENT DEPENDENCY ») sont caractérisés selon les liens qui avaient été identifiés dans le chapitre 4. Il s'agit donc des liens suivants : liens d'association, liens de dépendances organisationnelles, liens de positionnement, liens de dépendances fonctionnelles, liens de composition et liens de dépendances dimensionnelles. La structure du produit mise en œuvre dans CM-EC est le reflet de celles manipulées lors des phases de conception d'un nouvel avion. Cependant, quelques adaptations dues aux contraintes de développement (Cf. partie 3.1) et à l'enrichissement des liens ont été nécessaires.

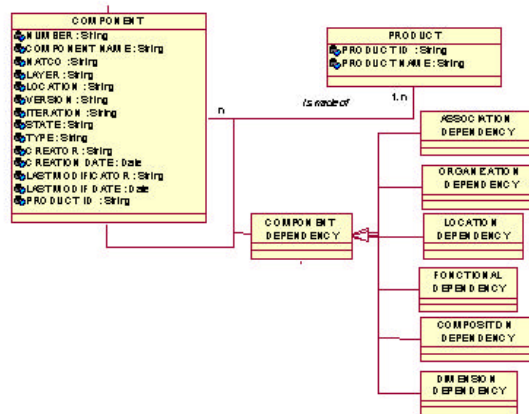


Figure 50 : Classes associées au produit

Au niveau de l'organisation, les quatre rôles possibles des utilisateurs sont spécifiés : l'administrateur (« ADMIN »), le gestionnaire de configuration (« CM »), l'acteur métier (« Actor ») ainsi que le membre du comité de contrôle de la configuration (« CCC member »). Un de ces rôles pourra donc être assigné à chaque utilisateur. Ces derniers peuvent cumuler plusieurs rôles (gestionnaire de configuration et administrateur, acteur et membre du comité de contrôle de la configuration). Le rôle central dans l'application CMEC reste tout de même celui du gestionnaire de configuration qui est responsable du traitement d'une ou plusieurs demandes de modification, c'est-à-dire d'un ou plusieurs espaces virtuels partagés (« VIRTUAL WORKSPACE »).

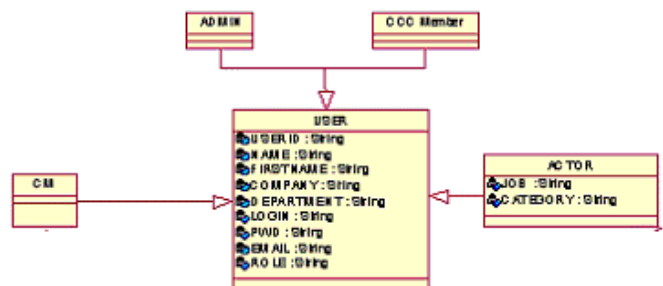


Figure 51 : Classes associées à l'organisation

Chaque espace virtuel est dédié au traitement d'une et uniquement une demande de modification («CHANGE PROPOSAL »). Toutefois, dans les cas de groupements, plusieurs demandes peuvent être groupées en une seule. Une trace de chaque groupement doit être conservée. A chaque demande sera ensuite associée une ou plusieurs solutions (« SOLUTION »). Suite à l'évaluation (« EVALUATION » et « FINAL EVALUATION ») de chacune d'entre elles, selon les critères proposés (« CRITERIA »), alors la sélection d'une solution devient possible en vue d'une introduction dans le cycle de développement. A partir de la demande et pour aboutir à une solution, le gestionnaire de configuration doit mettre en œuvre un processus de traitement (« PROCESS ») sélectionné depuis une bibliothèque de processus (« PROCESS LIBRARY »). Cette bibliothèque propose plusieurs squelettes de processus. Chaque squelette est adapté aux caractéristiques spécifiques d'une demande et permet ainsi de fournir une réponse adaptée à la demande. Un processus est composé de tâches

(« TASKS ») qui sont assignées aux différents acteurs selon un calendrier précis. Dans le processus de traitement, le passage d'une tâche à l'autre s'effectue au travers de mécanismes de notification automatique déclenchés par les acteurs eux-mêmes. Une tâche conduit à un résultat (« RESULT ») consultable par l'ensemble des utilisateurs ayant accès à l'espace de traitement. Un résultat peut prendre la forme d'un fichier (« FILE ») ou d'une décision (« DECISION ») quand le processus le requiert. De plus un module d'analyse d'impacts (« IMPACT ANALYSIS ») est fourni aux acteurs par l'application CM-EC. Cette analyse est basée sur les dépendances unissant les différents composants du produit.

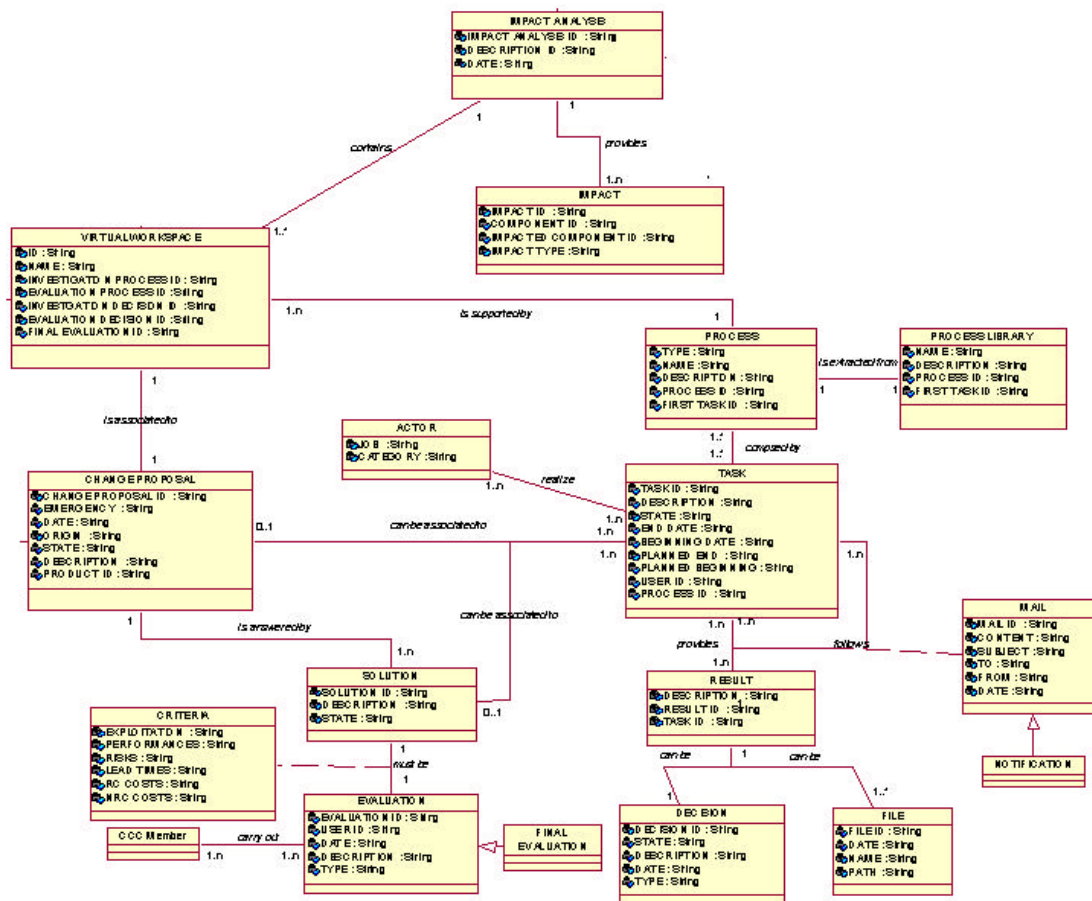


Figure 52 : Classes en rapport avec l'espace virtuel partagé

Dans les parties précédentes, ce sont les aspects fonctionnels de CM-EC qui ont été détaillés. Les aspects architecturaux et technologiques sont abordés dans la partie suivante.

2.4.2 L'architecture de CM-EC et technologies utilisées

L'application CM-EC est un démonstrateur. Elle ne sera donc pas déployée dans un contexte industriel auprès d'un groupe important d'utilisateurs ou pour une utilisation réelle dans les processus de développement. Son but est d'illustrer les concepts proposés dans le cadre de la proposition détaillée dans le chapitre 4 afin de démontrer les apports et les éventuelles limites de sa mise en œuvre. L'objectif est également de déterminer les répercussions de ces concepts sur les outils utilisés pour la gestion des modifications en phase de développement sans pour autant prétendre à une intégration

immédiate. Ces choix ont des conséquences sur l'architecture du démonstrateur et sur les technologies de développement informatique employées. En effet, l'application CM-EC doit se conformer aux contraintes projet suivantes :

- temps et coûts de développement réduits s'inscrivant dans les contraintes liées au projet,
- facilité d'installation du démonstrateur,
- facilité de développement (langage de programmation courant avec informations disponibles sur internet),
- modularité du démonstrateur à des fins de réutilisation du code ou de briques logicielles,
- capacité de l'application à évoluer en fonction des commentaires issus des évaluations et des démonstrations,
- facilité d'appropriation et apprentissage des technologies par les utilisateurs.

En fonction de ces contraintes et par rapport aux spécifications fonctionnelles et techniques, c'est une architecture de type « 3-Tiers » qui a été privilégiée pour le démonstrateur CM-EC. Cette architecture composée de trois couches distinctes (Cf. Figure 53) est devenue un standard de développement pour les applications industrielles destinées à l'industrie. Elle s'est répandue avec l'essor des applications sur les réseaux de type internet en levant des limitations des architectures « Client-Serveur » traditionnelles telles que les performances, la complexité de mise en œuvre dans un environnement hétérogène (syndrome du client « lourd ») ainsi que les coûts excessifs de déploiement et de maintenance de l'application.

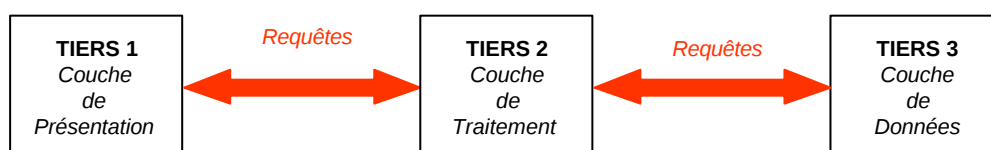


Figure 53 : Les couches d'une architecture 3-Tiers

La couche de présentation (Tiers 1) permet de gérer les interactions entre l'utilisateur et l'outil. Sans intelligence, déportée sur des interfaces multiples, c'est à ce niveau qu'intervient le dialogue entre l'utilisateur, le processus de traitement et les objets associés. Le dialogue s'effectue au travers d'événements et de variables transmises par des requêtes vers la couche de traitement.

La couche de traitement (Tiers 2) constitue le cœur de l'application. C'est la partie « intelligente » de l'application capable de gérer les événements de la couche de présentation selon une logique métier programmée. Pour cela, elle est constituée d'un serveur et de programmes de traitement s'appuyant sur les données gérées grâce à la dernière couche. Le regroupement sur cette couche de l'ensemble des traitements permet de simplifier l'installation, le déploiement et la maintenance des applications.

Enfin, la couche de données (Tiers 3) contient généralement un serveur de bases de données ainsi que les bases elles-mêmes permettant d'assurer la cohérence et la pérennité des données manipulées par les utilisateurs.

Si les couches restent bien distinctes, elles peuvent communiquer entre elles grâce à des requêtes comme le montre la Figure 54 qui décrit l'architecture de l'application CM-EC.

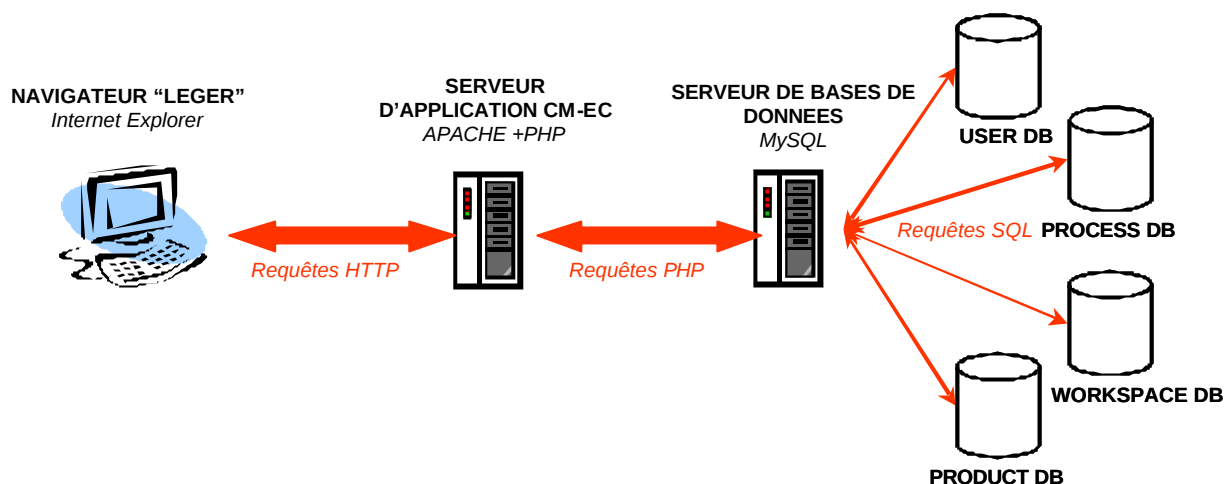


Figure 54 : Architecture "3-Tiers" de l'application CM-EC et technologies mise en œuvre

Dans CM-EC la couche de présentation est supportée par un navigateur «léger» de type Internet Explorer⁴⁰. La qualification «léger» signifie qu'aucune installation de logiciels n'est nécessaire sur les postes clients pour utiliser le démonstrateur (utilisation du langage HTML⁴¹). Le déploiement de l'application est donc plus aisé (seuls l'adresse du serveur et le navigateur sont requis). Toutes les opérations effectuées par l'utilisateur depuis le navigateur sont transférées vers le serveur d'application via des requêtes http⁴². Le serveur d'application, qui constitue la deuxième couche, repose sur la technologie APACHE⁴³ (logiciel libre). Les programmes de traitement qu'il contient sont quant à eux développés en langage PHP⁴⁴. PHP est un langage de script exécuté par le serveur APACHE. Il permet un déploiement rapide et léger. Le code PHP est réutilisable et non-propritaire. Les programmes en PHP s'appuient en partie sur les données gérées par la troisième couche avec laquelle une communication est entretenue grâce aux requêtes PHP. Cette couche contient un serveur de base de données de type MySQL⁴⁵ ainsi que les bases de données décrites dans les spécifications techniques : Product DB, Workspace DB, Process DB et User DB.

L'architecture et les technologies utilisées ne requièrent pas d'installations lourdes ni un environnement de développement spécifique. De plus, toutes ces technologies sont libres tout en étant éprouvées.

2.4.3 Les interfaces du démonstrateur CM-EC

Puisque CM-EC est un démonstrateur, une attention particulière doit être apportée à la conception des interfaces. Elles doivent être homogènes, cohérentes, non ambiguës et doivent pouvoir évoluer facilement.

CM-EC étant une application permettant de gérer des espaces virtuels partagés pour le traitement des modifications, les interfaces ne sont pas les mêmes d'un utilisateur à l'autre pour un même espace. Elles dépendent en partie du rôle de l'utilisateur et des

⁴⁰ <http://www.microsoft.com/windows/ie/default.asp>

⁴¹ HTML= Hyper Text Markup Language

⁴² http : Hyper Text Transfer Protocol.

⁴³ <http://www.apache.org/>

⁴⁴ <http://www.php.net/>

⁴⁵ <http://www.mysql.com/>

tâches qui lui sont assignées dans le processus de traitement. La conception de chacune d'entre elles mais surtout leur enchaînement doit donc s'appuyer sur les modèles de navigation tels que ceux décrits par les Figure 69 et Figure 70 disponibles en annexe de ce document.

3 Démonstration des fonctionnalités principales de CM-EC

A partir des spécifications fonctionnelles et techniques détaillées dans les sections 2.3 et 2.4, une première version du démonstrateur CM-EC a été développée. Le but de cette partie est de démontrer les fonctionnalités principales de l'application en se basant sur un exemple aéronautique précis. Mais avant de réaliser cette démonstration, le périmètre des fonctionnalités développées est revu en fonction des aléas rencontrés lors du développement de CM-EC.

3.1 Le développement du démonstrateur

Les spécifications fonctionnelles et techniques ont servi de données d'entrée pour le développement du démonstrateur CM-EC. Pourtant, les délais associés à la réalisation de ce projet ⁴⁶ n'ont pas permis de mettre en œuvre l'ensemble des fonctionnalités et de respecter certaines des spécifications décrites initialement. Parmi les fonctionnalités/cas d'utilisation qui n'ont pas pu être développés, nous trouverons :

- Les cas d'utilisation associés au rôle de membre du CCC

Si une réponse logicielle a été apportée dans la majorité des cas d'utilisation identifiés pour chacun des rôles, ceux relatifs au rôle de membre du Comité de Contrôle de la Configuration (CCC) n'ont pu être implémentés. Toutefois, malgré cette absence, il est possible d'illustrer le déroulement complet d'un processus de traitement d'une demande de modification dans un espace virtuel partagé.

- La gestion de la base de données produit (« Product » DB »)

Initialement, cette base de données devait contenir les informations relatives au produit issues d'une application PLM utilisée pendant le processus de développement d'un nouvel avion. Cette configuration devait permettre un couplage fort entre cette application PLM et le démonstrateur CM-EC en garantissant la cohérence des informations manipulées dans, et entre chacune d'entre elles. Malheureusement, le développement d'une passerelle entre les deux applications s'avérait techniquement complexe et coûteux. Dans le démonstrateur CM-EC c'est donc une réplique de la base PLM qui a été réalisée. Si elle ne permet pas une utilisation du démonstrateur CM-EC dans un contexte industriel, elle permet d'illustrer les apports de la proposition sur des exemples aéronautiques. De plus, puisqu'il s'avère difficile de suivre un cycle de développement complet d'un nouvel avion, les liens entre composants ont été générés aléatoirement. Ces difficultés seront abordées ultérieurement dans la partie 4 ainsi que dans le chapitre 6.

- La bibliothèque de processus

Pour des raisons techniques, le concept de bibliothèque de stratégies/processus de traitement adaptés à la demande de modification n'a pas pu être démontré dans CM-

⁴⁶ Le projet de développement s'est déroulé sur trois mois et a été pris en charge par trois développeurs débutants

EC. Pour être efficace, ce module doit s'appuyer sur des technologies devant permettre la gestion d'événements dynamiques riches (tels que la création dynamique de schémas) comme le langage Java⁴⁷ que l'architecture choisie ne rendait pas possible sans effort de développement conséquent. Malgré tout, l'aspect « processus » est présent dans le démonstrateur CM-EC mais sous une forme statique et non adaptable aux caractéristiques d'une demande de modification mais auquel il est possible d'associer un planning et des ressources.

▪ La sauvegarde des messages échangés

Aujourd'hui avec le démonstrateur CM-EC, il est possible d'utiliser deux vecteurs de communication associés à chaque espace de traitement : un forum et une messagerie électronique. S'il est possible de sauvegarder chronologiquement les messages postés sur le forum, cela est impossible pour les messages échangés via les messageries. Aucune trace relative aux notifications n'est donc archivée. Par conséquent, des informations relatives à la démarche de résolution d'un problème et de construction des solutions sont perdues. Mais ce manque ne met pas en danger la certification de l'appareil car celle-ci ne concerne que des informations structurées et validées.

Ainsi, comme le montre le Tableau 41, en se basant sur les besoins opérationnels résumés dans le Tableau 40, il est possible de définir l'adéquation de la solution logicielle apportée par CM-EC avec les besoins constatés.

REQUIS	BESOINS	Réponse CM-EC
Production	Faciliter l'accès aux informations lors du traitement d'une modification	+
	Analyser l'impact des modifications et des solutions	+
	S'assurer de l'intégrité fonctionnelle du produit	+
	Permettre la réutilisation des informations	+ / -
	Supporter les prises de décisions	+
Coordination	Adapter le processus de traitement aux types de modifications à traiter	-
	Adapter le processus de traitement à la configuration de l'organisation	+
	Piloter et contrôler le processus de traitement	+
	S'assurer de la traçabilité des informations générées en vue de la certification du produit	-
Communication	Mettre en place des dispositifs de collaboration dans le processus.	+

Tableau 41 : Réponse du démonstrateur CM-EC aux besoins opérationnels

Malgré ces quelques limitations, une illustration des fonctionnalités principales du démonstrateur CM-EC est possible.

3.2 Illustration des fonctionnalités principales du démonstrateur CM-EC

Illustrer de manière statique les fonctions supportées par une application informatique s'avère être une tâche complexe si l'on souhaite montrer le traitement d'une demande de modification de sa formalisation à l'apport d'une solution technique. Pour cette raison nous avons choisi d'illustrer et commenter les fonctions et cas d'utilisation principaux de l'application sans s'attacher au processus de traitement.

⁴⁷ <http://java.sun.com>

3.2.1 Présentation des espaces en fonction des rôles et des caractéristiques des utilisateurs

Dans CM-EC, la structuration et la présentation des espaces dépendent :

- du rôle de l'utilisateur,
- de ses données personnelles qui permettent d'identifier les espaces virtuels dans lesquels est impliqué l'utilisateur.

Ces informations sont renseignées dans l'application par l'utilisateur lorsque celui-ci valide son identifiant et son mot de passe (Cf. Figure 55).

Un utilisateur identifié comme gestionnaire de configuration n'aura accès qu'aux espaces de traitement dont il est responsable. Ces espaces ne sont pas identifiés formellement mais grâce au numéro de la demande de modification (1) à laquelle il est associé et selon l'état de cette demande (2), ce qui équivaut donc à l'état de l'espace. Depuis cette page le gestionnaire de configuration peut également créer de nouvelles demandes de modification qui déboucheront sur la création de nouveaux espaces virtuels.

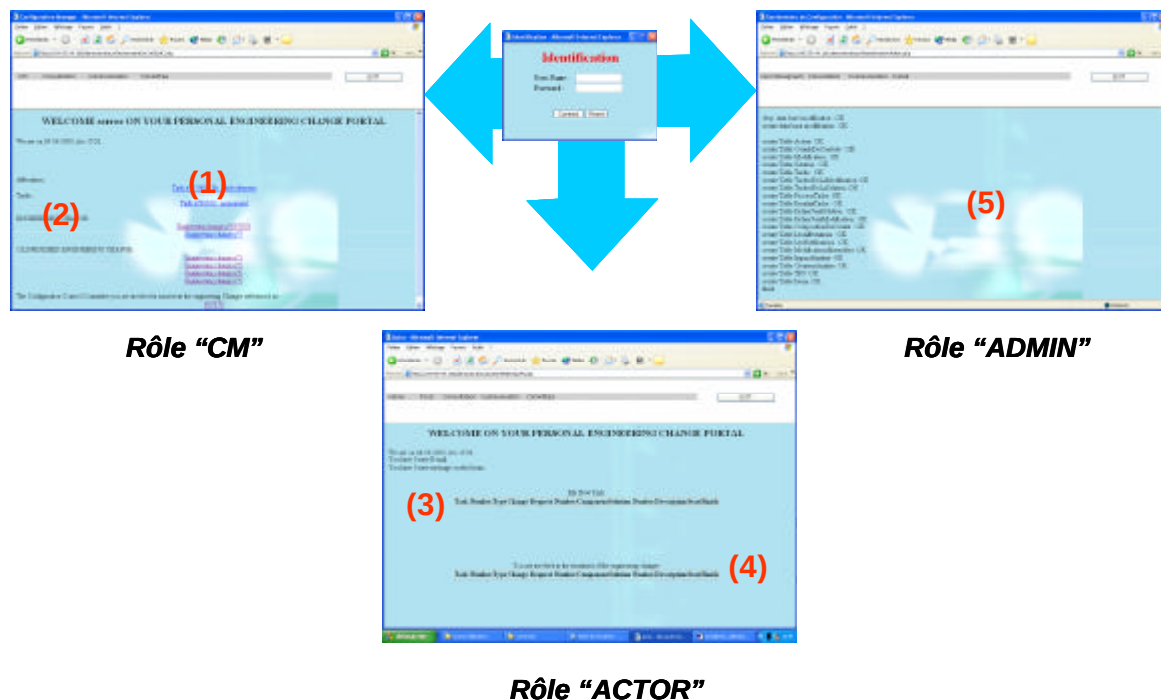


Figure 55 : La présentation des interfaces dépend des rôles et des caractéristiques de l'utilisateur

Après connexion, un utilisateur identifié comme un acteur dans le processus de traitement peut visualiser une page qui contient uniquement les tâches dans lesquelles il est impliqué. La page d'accès est donc différente d'un acteur à l'autre. Les tâches dans lesquelles un acteur est impliqué sont de deux types : celles qui lui ont été assignées et celles qu'il a accepté de réaliser. Avant de débiter une tâche l'acteur doit formellement l'accepter (en cliquant sur la tâche). Cette acceptation dépend généralement de sa charge de travail mais aussi de sa cohérence avec les compétences qu'il entretient. Lorsque l'acteur clique sur une tâche acceptée, il accède alors à l'espace correspondant.

Quant à lui, un administrateur ne peut pas accéder directement aux espaces, son but est de gérer les différentes bases de données ainsi que les privilèges des utilisateurs (5).

3.2.2 Analyse d'impacts des modifications

L'analyse d'impacts des demandes de modification est un module de CM-EC mis à disposition des acteurs mais aussi des gestionnaires de configuration. Il est accessible depuis le processus de traitement ou indépendamment de celui-ci pour réaliser des analyses de pré-faisabilité. Le but de ces analyses est de découvrir d'éventuelles propagations des demandes de modifications du composant initialement impacté vers d'autres composants du système au travers des liens qui les unissent. Ce module s'appuie sur l'algorithme développé dans le cadre de la proposition décrite dans la partie 3.1.2.1 du chapitre 4. Le but de cette démarche n'est pas d'effectuer une analyse quantitative des propagations potentielles mais plutôt une analyse qualitative. De plus, le but est de guider l'utilisateur dans la recherche de propagations éventuelles. Il est donc libre d'approfondir plus en détail les résultats qui lui sont proposés (Cf. Figure 56).

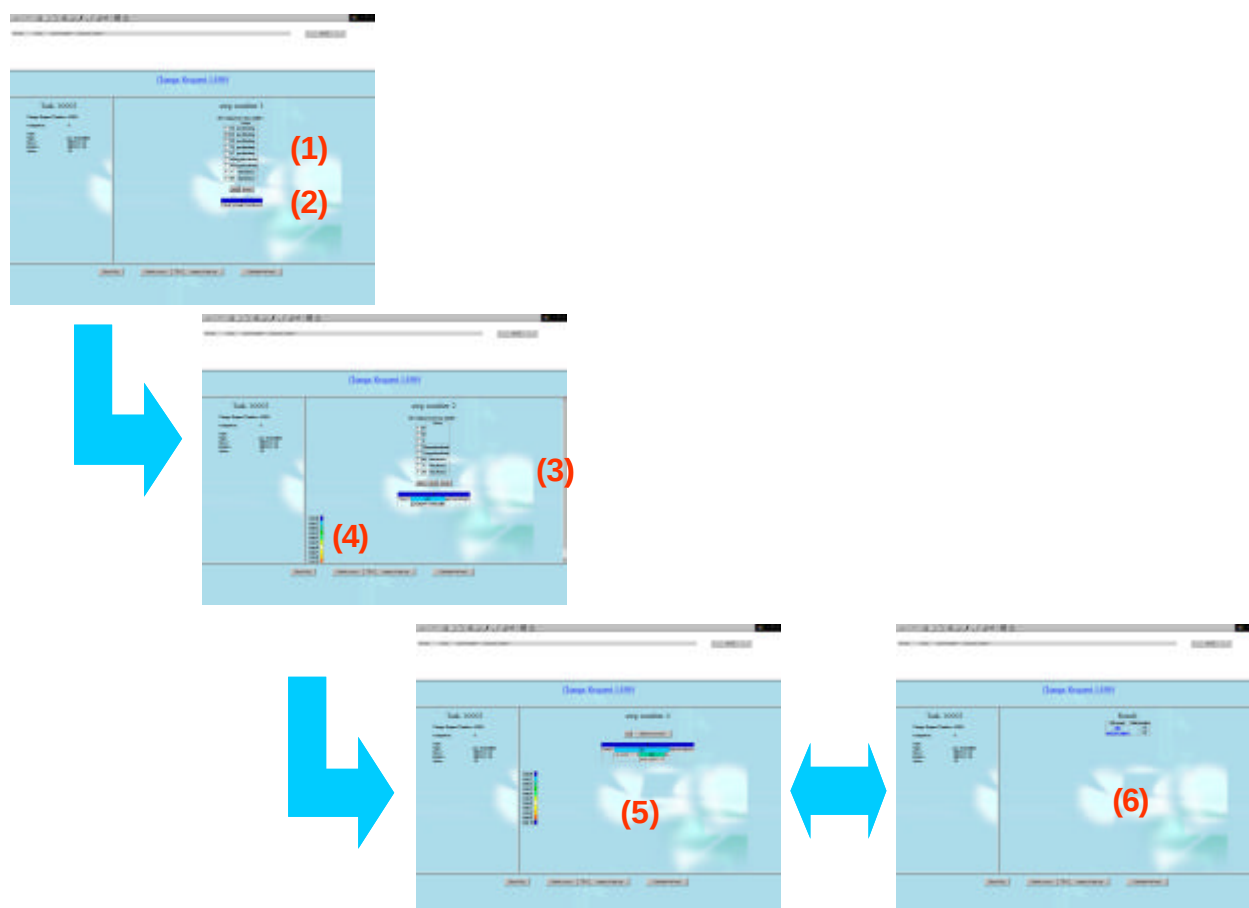


Figure 56 : Analyse d'impacts des modifications

A partir de la référence du composant initialement impacté, l'analyse est déclenchée une première fois. Les résultats sont présentés sous la forme d'un tableau indiquant les

composants vers lesquels une propagation est possible ainsi que le type de lien⁴⁸ qui les unit (1). Une représentation graphique sous la forme d'un arbre est également disponible (2). A partir de cette analyse du premier niveau, l'utilisateur peut ensuite poursuivre ses investigations sur des composants spécifiques en les sélectionnant. Les résultats de cette analyse du second niveau sont également présentés sous la forme d'un tableau (3) et l'arbre enrichi. Les couleurs associées à cet arbre montrent, pour chaque niveau, les composants sélectionnés pour de plus amples investigations parmi ceux proposés. Une légende permet d'identifier les composants sélectionnés pour les différents niveaux d'analyse (4). L'analyse d'impacts peut se poursuivre sur plusieurs niveaux laissés à la discrétion de l'utilisateur (5). Quand ce dernier juge que ces investigations sont closes alors il peut les sauvegarder comme un résultat de la tâche qui lui a été assignée (6). Par conséquent, il est possible de consulter à tout moment les investigations menées par l'utilisateur.

3.2.3 Gestion et supervision des processus de traitement

Lors de l'enregistrement d'une nouvelle demande de modification, le gestionnaire de configuration, responsable du système impacté, crée un nouvel espace auquel il associe un processus de traitement. A chacune des tâches de ce processus, il peut allouer dynamiquement une ressource ainsi qu'un planning d'exécution, c'est à dire les dates de début et de clôture (1). Ces données lui permettent ensuite de superviser l'avancement du processus de traitement une fois qu'il est déclenché (2). Grâce à la définition d'un code de couleurs, le gestionnaire de configuration peut identifier, en visualisant le processus associé à un espace, l'avancement de différentes tâches : clôturée (grise), en cours (vert), devrait être commencée (orange), devrait être commencée et clôturée (rouge), n'est pas commencée tout en restant conforme en planning (blanc).

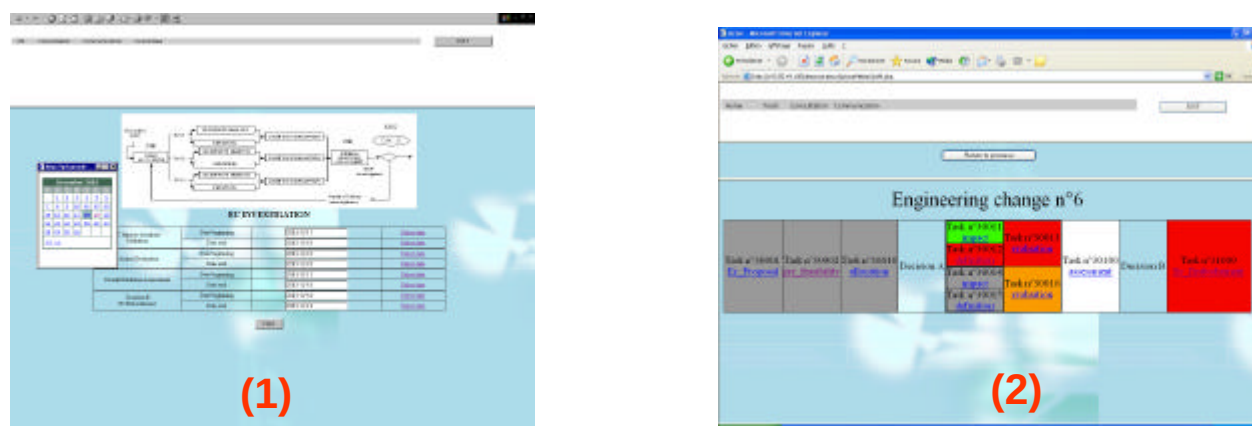


Figure 57 : Gestion et supervision des processus

3.2.4 Communication : notification et forum

Dans l'application CM-EC, deux modes de communication entre utilisateurs sont possibles : le forum et la messagerie électronique.

Le forum, indépendant des espaces, permet aux utilisateurs d'échanger des informations de manière informelle et peu structurée (Cf. Figure 58). Pour que ce moyen de communication soit efficace, une référence à une demande de modification doit être

⁴⁸ Les six types de liens existants sont : les liens de composition, les liens d'association, les liens de dimensionnement, les liens de positionnement, les liens de dépendances organisationnelles et les liens de dépendances fonctionnelles.

faite. Ces échanges devraient ensuite être archivés afin de conserver un historique des problèmes rencontrés au cours d'un traitement mais surtout la démarche qui a été mise en œuvre pour leurs résolutions.

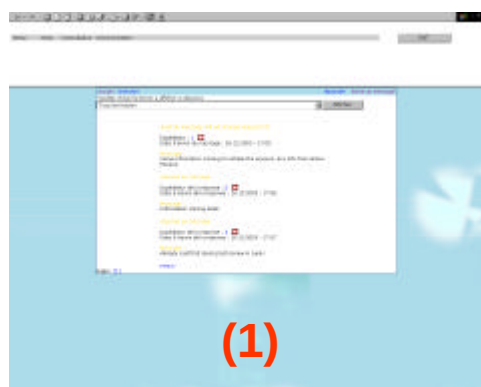


Figure 58 : Exemple de forum dans un espace de traitement

L'autre vecteur de communication est la messagerie qui supporte les mécanismes de notification automatique mis en œuvre dans le processus de traitement (Cf. Figure 59). Quand un utilisateur juge que la tâche qui lui a été assignée par le gestionnaire, dans le processus de traitement, est terminée, il doit alors la valider. La validation entraîne une notification automatique de cette clôture aux utilisateurs impliqués dans les tâches suivantes ainsi qu'au gestionnaire de configuration concerné (2,3). Lors de la validation, l'utilisateur peut ajouter un commentaire au message qui sera envoyé afin d'expliquer les résultats qu'il met à disposition dans l'espace. De plus, cet envoi déclenche automatiquement une mise à jour de l'assignation des tâches aux différents acteurs dans l'espace.

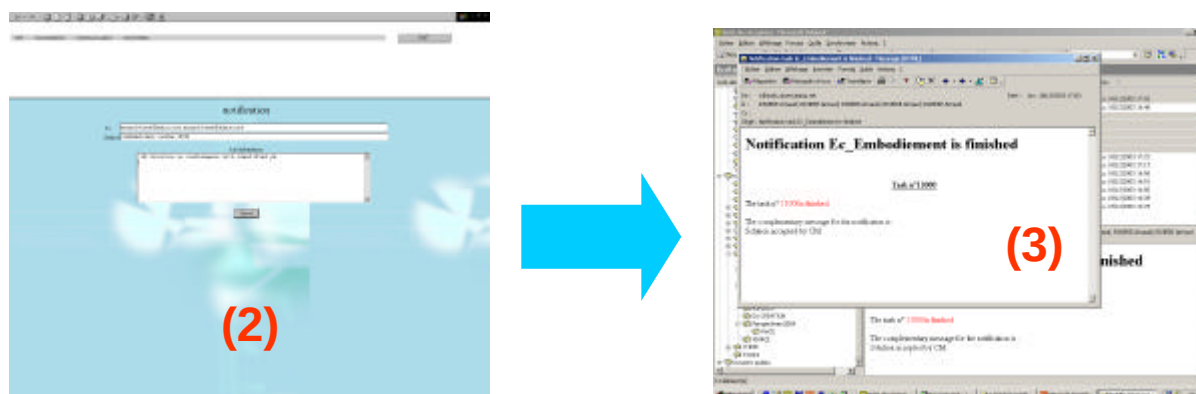


Figure 59 : Notification automatique lors de la validation des tâches

3.2.5 Evaluation des solutions

Dans le processus de traitement d'une demande de modification, une partie des activités se rapporte au développement de solutions techniques. Parmi ces alternatives, une solution doit être sélectionnée en vue d'une définition complète puis d'une intégration physique dans un système. Cette décision est prise par le comité de contrôle de la configuration sur la base des évaluations réalisées par les acteurs impliqués dans le développement de chacune d'entre elles. Le module d'évaluation disponible dans le démonstrateur CM-EC s'appuie sur la méthode proposée dans la partie 3.2.3.2 du cha-

pitre 4. Cette méthode vise à positionner chaque solution par rapport à des critères d'exploitation, de performances et de coûts d'introduction (1).

Chacun des utilisateurs impliqués dans le développement d'une solution en fournit une évaluation selon les critères proposés. Elle permet de déterminer l'influence d'une solution sur le projet mais aussi sur les systèmes remis en cause. L'agrégation de l'ensemble des évaluations pour une même solution permet de la positionner sur un graphe de type radar (2). Lorsque l'ensemble des évaluations est disponible pour l'ensemble des alternatives étudiées, il est alors possible de positionner les solutions les unes par rapport aux autres. Cette représentation facilite le travail du comité de contrôle dans la sélection d'une solution, bien que ce ne soit pas la seule information qui soit prise en compte.

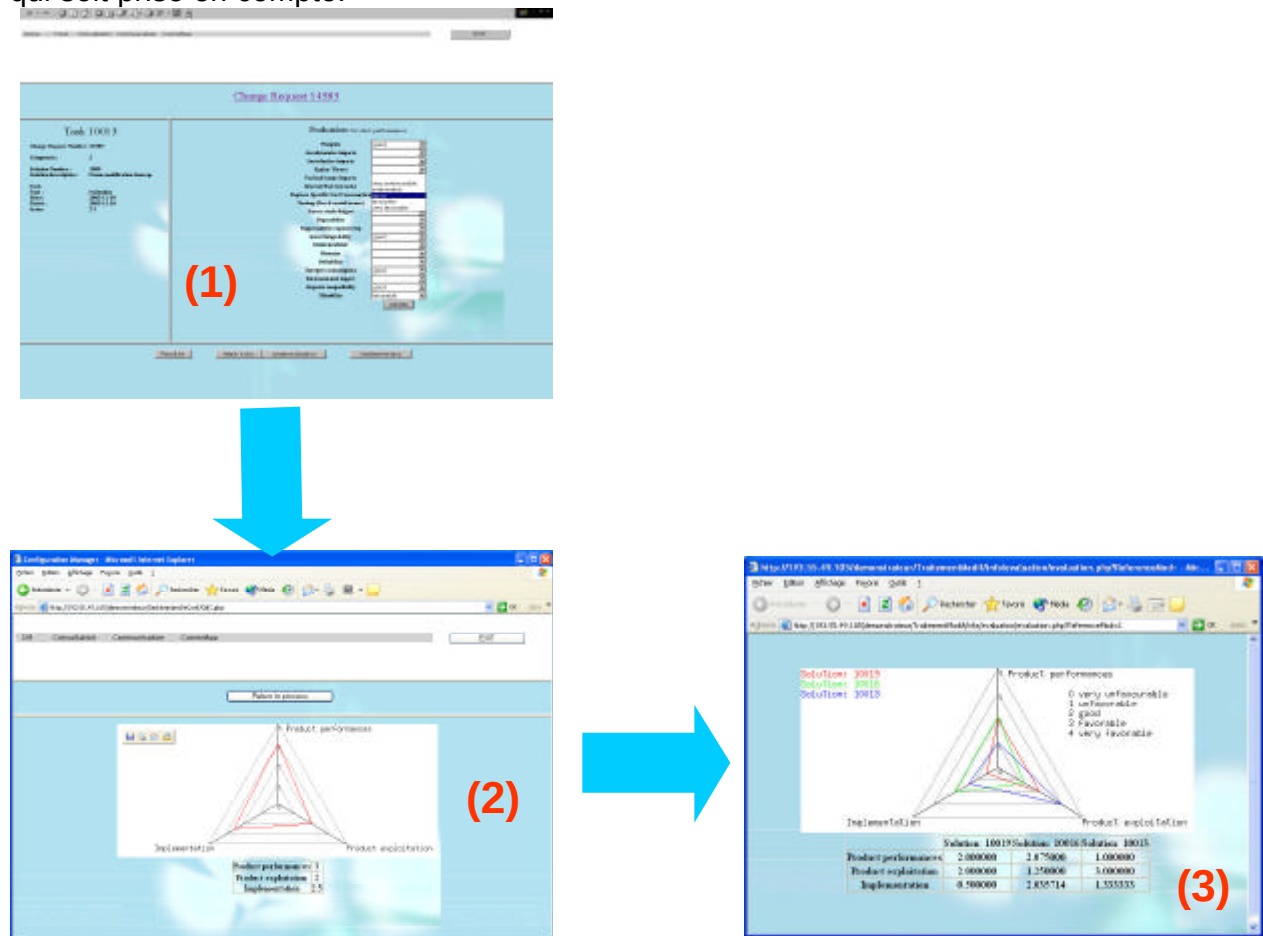


Figure 60 :Evaluation des solutions

4 Evaluation du démonstrateur CM-EC

Durant la rédaction des spécifications fonctionnelles et techniques mais aussi pendant les démonstrations de l'outil CM-EC, les remarques formulées par nos divers interlocuteurs issus de l'industrie mais aussi du monde académique ont permis de consolider nos premières évaluations. Même s'il n'a pas été possible d'utiliser CM-EC sur le traitement d'une demande de modification réelle dans un contexte aéronautique, il a été possible de s'inspirer de processus ayant déjà été clôturés pour simuler un cas d'application.

Les commentaires collectés sont de natures diverses, généralement dépendants du champ d'expertise des interlocuteurs. Ainsi, les remarques des interlocuteurs impliqués dans la gestion de configuration d'appareils en cours de développement étaient le plus souvent relatives à la capacité de l'outil à supporter les processus existants de traitement des modifications ou à s'y intégrer. Celles relatives aux performances ainsi qu'aux caractéristiques de l'outil étaient le plus souvent faites par des interlocuteurs engagés dans le développement et le déploiement d'applications d'ingénierie. Enfin, toujours d'un point de vue industriel, les remarques faites par les interlocuteurs impliqués dans le développement d'un système de l'avion ont fourni une idée de l'appropriation possible de l'outil par les acteurs. Les remarques et suggestions apportées par les partenaires du monde académique étaient, quant à elles, plus souvent relatives à la robustesse des méthodes intégrées dans l'outil ainsi qu'à la valeur ajoutée sur les processus de l'organisation.

Le but de cette partie est de fournir une évaluation claire du démonstrateur CM-EC à la lumière des commentaires récoltés mais aussi d'identifier d'éventuelles remises en cause de la proposition détaillée au chapitre 4 par rapport à sa mise en œuvre dans une application informatique.

4.1 Support CM-EC par rapport aux processus de gestion des modifications existants dans l'organisation

Dans l'industrie aéronautique civile, la gestion des demandes de modification est pilotée par chaque programme. C'est à ce niveau qu'une nouvelle demande est enregistrée et que sa gestion est supervisée à la fois sur les plans techniques et sur les plans commerciaux. En fonction des implications techniques de cette demande, la demande est ensuite confiée pour étude aux diverses entités de l'organisation qui définissent une solution qui est ensuite transmise aux unités de fabrication. Dans sa version actuelle, le démonstrateur répond en partie aux besoins des unités d'études auxquelles sont confiées les demandes par le programme. En effet, CM-EC n'intègre pas les phases d'évaluation économique de la modification mais uniquement les aspects techniques. Ainsi, CM-EC peut être positionné par rapport aux processus de traitement des modifications gérés au niveau des unités d'étude et qui alimentent un processus se situant au niveau de chaque programme.

Cependant, par rapport à ces processus, un besoin essentiel n'est pas couvert par l'application CM-EC : la gestion des effectivités des demandes de modification et des solutions qui en découlent. La gestion des effectivités permet, à partir de l'ensemble des demandes de modification et de leur validité, de les grouper et de déterminer leurs effectivités, c'est-à-dire de déterminer sur quels appareils devront être montées les solutions qui en découleront.

Hormis cette limitation, CM-EC répond à l'ensemble des impératifs fixés par les procédures de gestion de configuration de l'organisation. CM-EC, reprend d'ailleurs, sous une forme électronique, les formulaires devant être remplis au cours du traitement d'une demande de modification (demande de Modification, fiche de répercussions techniques, etc.). Ce format simplifie la gestion de la documentation d'une modification et facilite son utilisation dans un mode collaboratif.

En dehors des processus de gestion de configuration, CM-EC peut influencer d'autres processus de l'organisation tel que le processus de développement comme détaillé dans les parties suivantes.

4.2 Le module d'analyse d'impacts

Le module d'analyse d'impacts des modifications disponible dans CM-EC permet aux utilisateurs d'appréhender la complexité des systèmes remis en cause par une demande. Il constitue un guide pour mener des investigations au sujet d'éventuelles propagations des demandes vers d'autres composants au-delà du composant originellement impacté.

Ce guide ne fournit toutefois que des informations qualitatives au sujet des propagations potentielles, c'est à dire le composant susceptible d'être impacté ainsi que le type de lien qui véhicule la propagation. Cette dernière information permet de définir la nature de la tâche qui devra être conduite en cas de propagation. Mais cette démarche n'indique pas l'ampleur de l'impact de la modification. Pour déterminer cet impact, la définition d'une démarche quantitative s'avèrerait nécessaire. Ce type de démarche permettrait, par exemple, de déterminer automatiquement la nouvelle localisation d'un composant au cas où le positionnement d'un autre système auquel il est lié doit être modifié. Toutefois, ce type de démarche, que l'on peut qualifier de « lourde » puisqu'elle devrait mettre en œuvre des modèles comportementaux, ne pourrait être appliquée qu'aux liens de positionnement et de dimensionnement. La modification des autres liens n'impliquant que des contrôles d'intégrité (liens de composition, d'association et de dépendances fonctionnelles) ou des réponses au niveau de la gestion du programme lorsque ce sont des liens de dépendances organisationnelles qui sont remis en cause.

Des inquiétudes ont d'ailleurs été formulées au sujet de la création de ces liens (Cf. partie 4.4) et de leur gestion tout au long du cycle de vie du système. En effet pour que l'analyse d'impact soit efficace, la représentation des liens doit être le reflet de la réalité, sans quoi les résultats fournis s'avèrent faux. Ce module devrait donc intégrer un algorithme permettant de vérifier l'intégrité théorique des liens ainsi qu'une fonction permettant d'effectuer un rapport sur les liens entre composants présents dans un système pour vérification manuelle par les gestionnaires de configuration.

4.3 Le module d'évaluation des solutions

Le module d'évaluation des solutions intégré dans CM-EC constitue une aide pour le comité de contrôle de la configuration en vue de la sélection, parmi les alternatives proposées, de la solution qui sera définie. Les évaluations associées à chacune des solutions ne portent pas sur leurs performances mais sur leurs influences par rapport aux performances du produit et sur son exploitation.

Etant une agrégation des avis exprimés par les utilisateurs ayant participé à leur développement, cette évaluation est basée sur leur expertise. Une telle démarche fournit, au fil du processus du traitement, une vision des avantages et des limitations des solutions sans pour cela nécessiter une étude spécifique de leurs intégrations lorsque leurs définitions sont clôturées. Une telle démarche comporte toutefois quelques limitations qu'il est, à ce stade, important de prendre en compte.

Les conflits entre les avis exprimés par les utilisateurs ne sont pas gérés par les algorithmes. Ainsi, une erreur ou un écart trop important entre deux avis pour un même critère peuvent difficilement être détectés. Cette configuration peut conduire à une évaluation faussée et ne fournit donc aucun support au comité de contrôle de la configuration.

De plus, l'algorithme utilisé n'intègre pas de facteurs de pondération associés aux différents critères. Deux types de poids pourraient fournir une évaluation plus fine des solutions. Les premiers sont les poids qu'il serait possible d'associer à chacun des critères selon le type de modification à traiter et selon le contexte dans lequel la demande est formulée. Une demande formulée expressément par une compagnie aérienne dans le cadre d'une négociation commerciale ne peut pas être évaluée de la même manière qu'une demande d'amélioration à plus long-terme, formulée par une unité de l'organisation et non cruciale pour l'exploitation du produit. Un second type de pondération pourrait être associé à l'expertise des utilisateurs afin de mettre en valeur les connaissances et l'expérience des utilisateurs dans la consolidation des évaluations mais surtout pour éviter des déséquilibres entre les avis des utilisateurs experts et novices.

4.4 Introduction possible de CM-EC dans l'organisation

La faisabilité de l'introduction d'une nouvelle application d'ingénierie doit être évaluée à deux niveaux : l'intégration dans le système d'information et l'appropriation par les utilisateurs. Il est ici fait abstraction des aspects économiques (notamment du ROI)⁴⁹.

Dans la partie 2.4.2, l'architecture du démonstrateur CM-EC a été détaillée. Son architecture « 3-Tiers » avec un client léger est construite à des fins d'illustration et de démonstration. Bien que ce principe d'architecture est maintenant devenu un standard dans l'industrie, les technologies mises en œuvre ne sont pas assez robustes pour supporter un déploiement auprès d'un grand nombre d'utilisateurs. En effet, la capacité de ces technologies à supporter des montées en charges lors de sollicitations simultanées peut être remise en cause. Il en va de même pour la capacité de l'application à évoluer. Le choix des technologies employées doit également se conformer aux standards adoptés par l'organisation afin de faciliter son introduction, le développement de passerelles vers d'autres applications, et simplifier sa maintenance. Par conséquent, une architecture plus robuste (par exemple une architecture de type J2EE⁵⁰) devrait être développée pour qu'une introduction CM-EC soit possible.

Au delà de la compatibilité de CM-EC avec les standards d'architecture existants, son intégration avec les bases de données et les outils existants dans le système d'information doit être pris en compte. CM-EC repose sur une base de données contenant des informations produit qui n'est pas lié au référentiel géré dans le processus de développement d'un nouvel avion. Le développement de ce lien constitue un coût d'intégration non négligeable. Mais une telle démarche peut conduire à réfléchir à l'intégration de CM-EC avec une application de type PLM maintenant largement répandue.

⁴⁹ La question du ROI peut être introduite par une pré-étude amont.

⁵⁰ J2EE signifie Java 2 platform Enterprise Edition. C'est le standard le plus courant employé pour le développement d'applications multi-niveaux basé sur les composants. Plus d'informations disponibles sur le site : <http://java.sun.com/j2ee/>

L'appropriation de l'outil par les utilisateurs, sans tenir compte de ses performances et de son ergonomie, dépend de l'influence de son utilisation sur leur charge de travail. A ce titre, CM-EC présente deux défauts majeurs. Tout d'abord, les liens utilisés pour l'analyse d'impacts doivent être créés lors des phases de conception et de définition. Cette activité supplémentaire ne fait pas aujourd'hui partie de ces processus. Elle constitue donc une charge supplémentaire pour les acteurs du développement. De la même manière, l'évaluation des solutions n'est pas actuellement effectuée dans les processus de traitement des modifications, alors que CM-EC les intègre. Mais ces quelques limitations doivent également être mesurées par rapport aux avantages apportées par CM-EC.

En effet, CM-EC constitue un référentiel dédié au traitement des demandes de modification pendant les phases de développement d'un produit complexe et géré de manière cohérente aux travers des espaces virtuels partagés. Ces espaces constituent d'ailleurs un moyen efficace pour gérer la collaboration entre les utilisateurs impliqués dans le processus.

5 Conclusions

Ce chapitre a présenté le démonstrateur CM-EC et détaillé ses avantages ainsi que ses limitations. Le démonstrateur CM-EC est basé sur la proposition décrite au chapitre 4. Il permet de traiter les demandes de modification de manière collaborative pendant les phases de développement de produits complexes en fournissant un référentiel commun et unique à l'ensemble des utilisateurs.

Basé sur des technologies issues de la TCAO, l'application CM-CE permet de gérer des espaces virtuels partagés, chacun d'entre eux étant associé à une demande de modification. L'ensemble des utilisateurs impliqués dans le processus de traitement d'une demande (qu'ils soient acteurs, gestionnaires de configuration ou membre d'un comité de contrôle de la configuration) peut se connecter à l'espace partagé afin d'accéder aux informations relatives au produit concerné et au processus mis en œuvre. Le gestionnaire de configuration peut ainsi coordonner les tâches confiées aux acteurs et superviser le déroulement du processus.

Deux des modules principaux de CM-EC sont le module d'analyse d'impacts des modifications ainsi que le module d'évaluation des solutions techniques. Le premier permet de détecter d'éventuelles propagations des modifications et guide l'utilisateur dans sa démarche d'investigation. Le module d'évaluation permet, quant à lui, de positionner les solutions les unes par rapport aux autres selon des critères déterminant leurs influences sur la performance du produit et son exploitation par les compagnies aériennes. Si la démarche supportée par ces deux modules est validée, ces derniers souffrent tout de même de quelques limitations soulignées dans les parties 4.2 et 4.3 de ce chapitre. De plus, CM-EC, dans sa version actuelle, ne met pas en œuvre la bibliothèque de processus de traitement adaptés aux caractéristiques des demandes de modification alors que cette fonction est considérée comme un besoin opérationnel.

Moyennant quelques efforts de développement et d'adaptation, l'intégration de CM-EC à des systèmes d'informations existants constitue un point crucial qu'il est nécessaire d'étudier dans le détail afin d'évaluer les réels apports et limitations de l'outil dans un contexte industriel. Par rapport à ce sujet et à ce type d'outil, il existe encore des perspectives de recherche ouvertes qui seront détaillées dans le chapitre 6.

Chapitre 6

Synthèse et perspectives

1 Introduction

Les résultats qui sont présentés ici sont l'aboutissement d'un projet s'étant déroulé sur près de trois ans. Ils peuvent être regroupés selon plusieurs thèmes correspondant au découpage de ce manuscrit en différents chapitres.

Ainsi le premier chapitre 1, offre un tour d'horizon du contexte dans lequel s'est déroulé ce projet, c'est-à-dire l'industrie aéronautique civile, et décrit les enjeux et les contraintes associés au développement d'un nouvel avion.

Le développement d'un nouvel avion est une activité complexe et distribuée qui impose la mise en place de pratiques de gestion du patrimoine informationnel du produit et de ses évolutions. Ces pratiques sont plus connues sous le nom de normes de gestion de configuration. Le second chapitre décrit l'apport de ces normes et détaille leurs différentes composantes (identification de la configuration, maîtrise de la configuration, enregistrement de la configuration et audit de la configuration). Il se focalise ensuite sur la manière dont celles-ci sont supportées par les applications de type PLM.

La maîtrise de la configuration, c'est-à-dire la gestion des modifications de la configuration d'un produit, constitue le cœur de ce projet. Si ce processus de gestion est mal maîtrisé, voire peu performant, le projet de développement d'un nouvel appareil peut être affecté. Le chapitre 3 a pour objectif de décrire l'ensemble des contributions visant à optimiser ce processus et de les positionner par rapport aux besoins opérationnels recueillis. Cette démarche permet ensuite d'établir la contribution de ce projet à la résolution d'une problématique industrielle à laquelle des réponses ont déjà partiellement été apportées.

La contribution de ce travail est détaillée au chapitre 4 et propose un modèle de processus de traitement des modifications pour les appareils en cours de développement. Elle est ensuite mise en œuvre dans une application informatique baptisée CM-EC (Collaborative Management of Engineering Changes) à des fins d'illustration. L'illustration de ces concepts a permis d'évaluer leurs maturités, leurs apports et leurs limitations mais aussi de débiter une réflexion sur la possibilité d'une introduction dans un environnement industriel.

L'objectif de ce chapitre est de synthétiser les résultats principaux de ce projet mais aussi d'envisager de nouvelles perspectives dans le domaine du traitement des modifications pendant les cycles de conception et définition de nouveaux produits complexes.

Toutefois, cette synthèse porte principalement sur notre proposition ainsi que sur sa mise en œuvre informatique.

2 Proposition d'une méthode de traitement des modifications lors du développement de grands produits complexes

Actuellement, le développement d'un produit complexe devant répondre à de fortes contraintes techniques ainsi qu'à des offres commerciales sans cesse plus compétitives, ne peut s'appuyer que sur un réseau d'unités industrielles distribuées partageant des ressources, des compétences et des connaissances. La définition et la réalisation du produit sont au centre de ce réseau et font donc l'objet d'un nombre important d'interactions pouvant conduire à des évolutions ainsi qu'à des modifications qui doivent être contrôlées. La gestion de configuration du produit, pendant les phases de développement, fournit des recommandations pour optimiser cette maîtrise tout en s'assurant de la cohérence des actions menées par les acteurs du réseau.

2.1 Le processus de gestion de configuration et le processus de développement d'un nouveau produit

Développés initialement pour les industries américaines de défense puis pour les programmes spatiaux, les processus de gestion de configuration ont ensuite été intégrés à l'ensemble des processus industriels et plus particulièrement aux cycles de développement de nouveaux produits. Cette intégration fait suite à l'identification dans les industries civiles, de contraintes et d'objectifs, pouvant être similaires à celles identifiées pour les grands programmes militaires. Tout d'abord, ce fut la nécessité de gérer de grands programmes (ou projets) supportés par des entités distribuées mais pourtant gérés par un donneur d'ordre central. Une telle configuration organisationnelle impose la mise en place d'un découpage des responsabilités et le développement de mécanismes de coordination des activités. Elle impose également la définition d'un référentiel ainsi que des mécanismes de gestion permettant d'assurer la cohérence et la pérennité du patrimoine informationnel du produit dans le temps. La gestion de configuration permet en partie de répondre aux exigences de qualité qui gouvernent les processus industriels actuels. De plus, elle vient compléter, dans une certaine mesure, les techniques de gestion de projet pour les grands programmes en se désolidarisant des principes de supervision temporelle de l'avancement des tâches pour se focaliser sur l'évolution de la structure produit et sur l'enrichissement des informations qui y sont associées.

Malgré ses attraits face aux enjeux de l'industrie aéronautique civile, la gestion de configuration ne constitue pas encore un ensemble de processus participant directement à l'amélioration des performances des organisations. Pourtant, ces processus peuvent apporter une réelle valeur ajoutée aux processus des industries si, toutefois, les concepts fondamentaux peuvent être extraits des normes existantes et dissociés du discours souvent réducteur des éditeurs de logiciels.

En se concentrant sur un processus de gestion de configuration particulier : la maîtrise des modifications, ce travail s'appuie sur les recommandations fournies par des normes telles que la RG Aéro 00023 [BNA97] ou la MIL-HDBK-61 [DOD97]. Le résultat obtenu est un processus de traitement des modifications simplifié, générique mais suffisamment précis pour répondre aux attentes des programmes aéronautiques.

Appliqué à la phase de développement d'un nouveau produit, la définition de ce processus montre les liens forts existants entre le domaine de la conception de produits nouveaux et la gestion de configuration (processus collaboratifs, découvertes et constructions simultanées des problèmes et des solutions, etc.). ***Le premier apport de ce travail concerne donc la construction d'un axe de recherche original pour aborder le domaine de la conception de nouveaux produits.***

2.2 Recueils des besoins opérationnels et revue des contributions associées aux processus de gestion des modifications

Ce projet de recherche s'appuie sur l'étude des processus de traitement des modifications mis en œuvre dans l'industrie et plus particulièrement dans l'industrie aéronautique civile. Au travers de l'étude et de l'évaluation de ces processus existants, il a été possible d'établir un recueil des besoins opérationnels dans ce domaine.

Parallèlement, en étudiant les contributions scientifiques existantes apportant des réponses (même partielles) à ces besoins et principalement issues du monde de la conception, il a été possible de définir un catalogue des pistes de recherche existantes.

Le second apport de ce travail concerne donc la définition d'un référentiel recensant l'ensemble des contributions apportées au domaine et en les positionnant vis à vis des exigences opérationnelles de l'industrie aéronautique.

La confrontation des besoins et des points de vues a permis de dégager des voies de recherche pertinentes pour l'établissement de notre proposition puis d'évaluer ultérieurement ses apports ainsi que ses limitations.

2.3 La méthode de traitement des modifications proposée

Le résultat principal de ce projet est la proposition d'une méthode visant à :

- traiter les demandes de modification au plus tôt dans le cycle de vie du produit,
- prévenir l'apparition de nouvelles demandes de modification dues à la propagation de modifications en cours de traitement,
- accélérer le processus de traitement des modifications tout en s'assurant de la qualité des solutions développées et en respectant les limites budgétaires fixées,
- évaluer les demandes de modification ainsi que les efforts à développer pour apporter une réponse afin de statuer sur l'opportunité de lancer un traitement,
- réutiliser, dans les nouveaux traitements, les connaissances acquises lors de traitements antérieurs.

Pour atteindre ces objectifs, un modèle de processus a tout d'abord été développé. Ce modèle décrit de manière générique et simplifiée les activités élémentaires qui le composent, leurs enchaînements et quand cela est requis, les conditions de transitions (aspects décisionnels). C'est donc une optimisation globale du processus qui est ici proposée.

A l'intérieur de ce modèle, des optimisations locales sont apportées à certaines phases du processus de traitement des modifications. Elles concernent principalement :

- la définition d'une bibliothèque de processus avec les mécanismes de gestion associés. Elle permet de sélectionner un « squelette » de processus en fonction des caractéristiques de la demande de modification à traiter puis de l'adapter en fonction des spécificités du contexte.
- la définition d'un algorithme d'analyses d'impacts supportant les acteurs dans les investigations menées au sujet d'éventuelles propagations de modifications.
- la définition d'une méthode d'évaluation des solutions techniques élaborées en réponse à une demande de modification et destinée à les positionner par rapport à des critères tels que leurs influences sur les performances du produit, l'exploitation du produit et les coûts d'introduction.

Le modèle de processus de traitement des modifications, la gestion de la bibliothèque de processus, la méthode d'analyse d'impact et la méthode d'évaluation des solutions constituent l'apport principal de ce travail de recherche. Cet apport est détaillé dans les sections suivantes.

2.3.1 Le processus de traitement des modifications

La définition du modèle de processus repose sur un certain nombre de constats établis durant les premières phases de ce projet :

- Le traitement des modifications est un processus collaboratif. Il fait intervenir différents types de métiers, maniant divers champs de connaissances et entretenant des expertises variées pour la réalisation d'un objectif commun. L'atteinte de cet objectif n'est possible que s'il existe une coordination des interventions de ces acteurs.
- Il est possible de considérer le traitement d'une modification comme un « micro » processus de conception dans lequel le problème et la solution se construisent simultanément. Toutefois, ce « micro » processus de conception est fortement contraint par la conception existante du système remis en cause, le cycle de vie du produit et la disponibilité des ressources.
- Des recommandations relatives aux processus de traitement existent déjà dans les normes de gestion de configuration et il est nécessaire de les fédérer afin de répondre aux besoins spécifiques de l'industrie aéronautique

Le modèle proposé (Cf. Figure 40 du chapitre 4) se base sur ces constats et tente de répondre aux besoins opérationnels recueillis durant les premières phases du projet. Ce processus est qualifié de générique puisque :

- son application peut être généralisée à des systèmes complexes en cours de développement autres que des avions,
- sa mise en œuvre peut être associée à la remise en cause de systèmes logiciels ou matériels,
- son application ne se cantonne pas à un type de demande de modification particulier.

Il est également simplifié puisque ce sont des activités de haut niveau qui sont représentées et pas uniquement les tâches élémentaires qui les composent. A l'inverse les optimisations locales suggérées pour certaines des activités sont plus spécifiques à l'industrie aéronautique.

Mais ce modèle ne fournit pas qu'un cadre statique pour la maîtrise des modifications pendant les phases de développement. Il offre également la possibilité de superviser l'avancement du processus grâce à la mise en place d'indicateurs dédiés à la gestion des modifications. Cette approche permet au gestionnaire de configuration de prendre connaissance, au plus tôt, des déviations des processus et d'engager les actions correctives. Dans l'état actuel de la proposition, les mécanismes de supervision doivent être raffinés afin d'apporter une réelle valeur ajoutée à l'activité des gestionnaires de configuration.

2.3.1.1 *La bibliothèque de processus*

Pendant les phases de développement d'un nouvel avion, différents types de demandes de modification peuvent être transmis au gestionnaire de configuration, responsable d'un système particulier de l'appareil. Quelle que soit la nature de la demande, c'est souvent le même type de processus de traitement qui est mis en œuvre conduisant parfois à des écarts entre la solution technique apportée et les attentes initiales des demandeurs. La volonté des programmes de maîtriser ces écarts mènent parfois à la mise en place de processus « officieux » difficiles à contrôler.

Afin de maîtriser ces écarts, une des propositions issue de ce travail est de déclencher un processus de traitement adapté aux caractéristiques de la demande de modification à traiter. Pour cela, une bibliothèque de processus de traitement a été créée. Elle associe une typologie de demandes de modification à un catalogue de « squelettes » de processus de traitement. Ainsi, selon les caractéristiques de la modification à traiter, l'acteur responsable du déclenchement du processus (généralement le gestionnaire de configuration) sélectionne un « squelette » de processus depuis la bibliothèque et l'adapte aux spécificités du problème à résoudre.

Cette approche n'est toutefois valable que si :

- la bibliothèque de processus est suffisamment riche,
- l'association entre la typologie des demandes de modification et le catalogue de processus est correcte.

A partir de notre proposition, des efforts de recherche sont encore requis sur ces deux axes afin que la démarche soit efficace et robuste sur le plan opérationnel.

2.3.1.2 *L'analyse d'impacts*

Lors du traitement d'une modification, un des phénomènes à contrôler est sa propagation depuis le composant initialement impacté vers d'autres composants du système. Ces propagations sont généralement véhiculées par les liens qui unissent les composants d'un système.

Un des résultats de ce projet est la définition d'une typologie des liens susceptibles de véhiculer une propagation (liens de composition, liens d'association, liens de positionnement, liens de dimensionnement, liens de dépendances fonctionnelles et liens de dépendances organisationnelles). L'établissement de cette typologie nous a amené à considérer le produit, non plus comme un arbre d'ensembles et de composants, mais comme un réseau.

En s'appuyant sur ce réseau, une méthode d'analyse d'impacts des modifications a été développée afin de détecter leurs éventuelles propagations. Cette méthode d'analyse fournit un support à l'utilisateur dans ses investigations en indiquant les organes sus-

ceptibles d'être remis en cause et selon quels liens avec le composant initial. Pour autant, l'algorithme développé ne permet pas de quantifier l'impact de la remise en cause. Il permet cependant aux acteurs d'appréhender la complexité du produit sans pour autant omettre des pistes de recherche.

2.3.1.3 L'évaluation des solutions

Dans le processus de traitement des demandes de modification, deux types de décisions existent. La première consiste, à partir de l'évaluation de la demande initiale, à décider s'il est opportun et judicieux pour le constructeur (mesure du rapport effort/gain) d'apporter une réponse, c'est-à-dire de développer une solution technique. Si cette décision est positive, alors les acteurs seront amenés à développer plusieurs solutions (des alternatives) parmi lesquelles une d'entre elles devra être sélectionnée. Pour réaliser cette dernière opération, une méthode d'évaluation des solutions techniques a été développée.

Cette méthode n'a pas pour but d'évaluer les performances de chaque solution mais d'apprécier leur influence sur les performances du produit, son exploitation et sur les coûts d'intégration. Elle permet seulement de visualiser l'équilibre de ces solutions selon ces trois critères. Chacun de ces critères est l'agrégation de sous-critères plus fins. L'ensemble des acteurs ayant participé au développement de la solution peut estimer chacun des sous-critères. La moyenne des avis exprimés est ensuite calculée pour chacun des sous-critères avant d'être eux-même agrégés selon les critères principaux.

L'évaluation de toutes les solutions sur ce principe permet de les positionner les unes par rapport aux autres. Ce principe d'évaluation peut supporter le processus de sélection d'une solution parmi les alternatives proposées. Elle souffre toutefois d'une limitation qui doit être levée pour être réellement efficace dans un contexte opérationnel : la pondération des critères qui permettrait d'adapter l'évaluation des solutions au contexte d'étude.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette proposition ont été illustrés par le démonstrateur CM-EC (Collaborative Management of Engineering Changes)

3 L'illustration de la proposition avec le démonstrateur CM-EC

L'objectif initial de l'application informatique CM-EC est d'illustrer la proposition ainsi que les concepts qui la supportent. En outre, cette démarche permet :

- d'enrichir la proposition en introduisant de nouvelles technologies participant à la réalisation des objectifs visés,
- d'évaluer la maturité de la proposition et des concepts et leur adéquation avec les besoins opérationnels,
- de déterminer l'influence de l'outil (et donc de l'usage) sur les concepts,
- de réfléchir à la création d'un nouveau type d'outil permettant de traiter efficacement les demandes de modification lors du développement d'un nouvel avion.

La majorité des fonctionnalités de CM-EC a été extraite de la proposition initiale. Toutefois, il a été souligné que le traitement des modifications était un processus de collaboration. CM-EC peut donc s'appuyer sur l'essor des nouvelles technologies de l'information et de communication ainsi que sur le développement des réseaux informatiques. Dans ce sens, CM-EC s'appuie sur une des technologies de la TCAO (Travail Coopératif Assisté par Ordinateur) : les espaces virtuels partagés.

A partir d'un référentiel informationnel commun, un espace virtuel partagé est une interface agissant comme un filtre selon certains attributs. Il peut ensuite être personnalisé selon chaque utilisateur permettant à ce dernier d'accéder uniquement aux informations et aux menus qui le concernent pour l'exécution des activités qui lui ont été assignées. L'existence de plusieurs espaces accessibles par différents utilisateurs, et surtout leur mise en relation permet de supporter des activités collaboratives synchrones. CM-EC est une application qui permet de créer et gérer ces espaces. Par conséquent, dans CM-EC, un espace est affecté au traitement d'une demande de modification auquel peuvent accéder les acteurs selon leurs rôles et leurs caractéristiques pour réaliser une tâche qui leur a été confiée dans le processus. Plusieurs acteurs peuvent donc travailler simultanément sur une même demande de modification, communiquer de manière synchrone sur les tâches qu'ils réalisent, tout en ayant des interfaces adaptées à leurs besoins ainsi qu'à leurs attentes. Chaque espace n'est valide que pendant la durée du traitement et placé sous la responsabilité d'un utilisateur qui joue le rôle de coordinateur (le gestionnaire de configuration).

Afin d'illustrer les fonctionnalités issues de la proposition ainsi que les apports des espaces virtuels partagés, l'application CM-EC s'appuie sur une architecture de type « 3-Tiers » ainsi que sur des technologies maintenant largement répandues (HTML, PHP, MySQL, etc.). Mais leur utilisation ne confère pas à l'application CM-EC la robustesse et les performances nécessaires pour intégrer le système d'information existant et donc pour une utilisation dans les processus industriels courants.

Mais cependant, l'illustration de la proposition initiale avec l'application CM-EC sur des exemples industriels concrets reste un des points forts de ce projet. Ce sujet n'est pas pour autant clos et laisse encore ouvertes d'importantes pistes de recherche tant au niveau du cadre conceptuel qu'au niveau des outils.

4 Perspectives

Les investigations menées dans le cadre de ce projet ont permis d'aborder le processus de conception de nouveaux produits complexes sous l'angle particulier du traitement des modifications. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de gérer les modifications survenant durant cette phase du cycle de vie du produit de manière efficace et rigoureuse tout en minimisant les répercussions sur l'avancement d'un projet de développement.

Si ce projet apporte une meilleure compréhension du phénomène, une vision sur la manière de l'appréhender et une proposition de solution, les résultats ne peuvent pas tous être exploités aujourd'hui dans un cadre opérationnel. Ils fournissent toutefois une base solide pour l'établissement de futurs projets de recherche qui conduiront certainement à une optimisation des processus de gestion des modifications mis en œuvre dans l'industrie aéronautique lorsque leurs résultats seront intégrés. Parmi les perspectives encore ouvertes sur ce sujet, nous détaillons ci-dessous celles qui semblent les plus pertinentes.

4.1 Améliorer et étendre la proposition actuelle

Dans leur état actuel, la proposition ainsi que l'outil développés peuvent faire l'objet de multiples améliorations. Les limitations de la proposition, soulevées par ailleurs, doivent

être levées mais son périmètre peut également être étendu afin de répondre à la grande variété des besoins opérationnels.

4.1.1 Améliorer la proposition actuelle et étendre son périmètre

Si la proposition se focalise sur le traitement d'une modification, elle devrait également intégrer le fait que, pour un même système, plusieurs modifications doivent pouvoir être gérées simultanément, de manière efficace et avec des ressources parfois limitées. C'est donc les notions de groupage et d'ordonnancement qui doivent être mises en avant afin de passer du traitement d'une modification individuelle à la gestion d'un « pool » de modifications selon certaines priorités industrielles et commerciales.

Parallèlement, bien que s'intéressant à des systèmes mécaniques complexes, la proposition ne semble fournir qu'une réponse adaptée aux métiers issus du monde de la mécanique (notamment ceux de la filière structure). Pourtant une modification peut impliquer des métiers issus du monde des logiciels ou des équipements. Le périmètre de la proposition devrait intégrer donc les spécificités de ces métiers.

De plus, le processus de traitement proposé est déclenché par l'enregistrement d'une nouvelle demande de modification et est clôturé par la sélection d'une solution. Dans la réalité, le processus est considéré comme terminé lorsque la solution choisie est physiquement intégrée au produit conformément aux dispositions établies. La portée du processus proposé doit donc être prolongée à cette phase.

4.1.2 Optimiser l'application CM-EC

Des améliorations de l'application ont été suggérées au chapitre 4 afin de tendre vers une intégration de l'application CM-EC avec le système d'information de l'organisation mais aussi avec les processus mis en œuvre par les différents métiers. Ces améliorations concernent :

- l'optimisation des performances de l'application ainsi que sa robustesse,
- la définition d'une architecture et de technologies compatibles avec celles couramment utilisées au sein de l'entreprise,
- la définition de passerelles avec les applications existantes (les « legacy »),
- la définition et l'intégration de modèles de données compatibles.

Une seconde version de l'application CM-EC, actuellement en cours de développement, mettra en œuvre une partie de ces améliorations.

4.1.3 Analyser la faisabilité d'une intégration

A partir de cette application optimisée, il sera alors possible de réaliser une analyse de faisabilité d'intégration de cette proposition dans un contexte opérationnel. Ce type d'analyse devra comprendre :

- une évaluation de l'outil par des représentants des différents métiers concernés afin de déterminer la réelle valeur ajoutée de la proposition,
- une évaluation des écarts entre l'application en l'état et l'application intégrée,
- l'identification des opportunités d'intégration de l'application dans le système d'information de l'organisation,
- la définition et l'évaluation d'un plan d'intégration de l'application comprenant à la fois les aspects temporels ainsi que les aspects économiques,

- la détermination des retours sur investissements (Return On Investments – ROI) possibles pour l'organisation si l'application est intégrée.

Si cette dernière phase correspond plus à un projet de recherche dont les résultats sont en voie d'industrialisation, des perspectives de recherches restent encore ouvertes.

4.2 De la détection des impacts à la simulation des modifications

D'après l'analyse bibliographique réalisée au cours de ce projet, l'analyse d'impacts des modifications ou des itérations au cours des phases de conception semble aujourd'hui être un sujet « porteur ».

Un des résultats de ce projet est une proposition de méthode permettant de détecter d'éventuelles propagations des modifications dans les systèmes complexes. Elle permet d'identifier les composants d'un produit susceptibles d'être impactés et le type de lien remis en cause. C'est donc une identification des impacts et leurs qualifications qui sont proposés ici. Les impacts ne sont pas ici quantifiés.

Dans le cycle de développement d'un système complexe, où une gestion plus proactive des modifications est nécessaire, c'est la quantification automatique de ces impacts qui est demandée. En effet, il est aujourd'hui nécessaire de définir automatiquement que la modification de l'attribut d'un composant selon une amplitude donnée affecte la valeur des attributs d'autres composants selon telles amplitudes. Cette piste de recherche implique donc la modélisation très fine d'un système, de ses composants ainsi que de leurs attributs. Elle implique également le développement de modèles et d'algorithmes permettant de déterminer et de quantifier le comportement des évolutions des attributs les uns par rapport aux autres.

Le développement de ces méthodes permettrait d'analyser finement et de manière quasi-automatique les impacts des modifications. De plus, elles permettraient également de simuler d'éventuelles modifications au sein d'un système pendant les phases amont de la conception, de détecter les demandes de modification au plus tôt, et donc, d'améliorer la robustesse du système conçu.

4.3 La gestion des connaissances dans les processus de traitement des modifications

Le traitement efficace des demandes de modification et la génération des solutions techniques qui en découlent reposent en partie sur les connaissances, l'expertise et l'expérience détenues par les acteurs de la conception et de la gestion de configuration. Elles permettent, par raisonnements analogiques, de détecter des similarités entre le problème posé par la demande de modification et des demandes auxquelles des réponses ont été apportées dans le passé. Ainsi, il devient possible d'optimiser les temps de traitement en :

- réutilisant des éléments d'analyse (techniques mais aussi économiques),
- réutilisant des principes de solutions déjà étudiés voire évaluées.

Par conséquent, une piste de recherche pertinente pourrait être de développer des mécanismes de capitalisation des connaissances acquises (notamment la démarche mise

en œuvre) au cours du traitement des modifications puis des mécanismes de réutilisation.

Chapitre 7

Conclusion Générale

Lors du développement de grands produits complexes en ingénierie concourante, l'apparition de modifications est inéluctable. Ce phénomène reste pourtant mal maîtrisé et il peut avoir des répercussions sur le produit, l'organisation, voire compromettre un projet de développement dans son ensemble.

Aujourd'hui, les systèmes PLM sont présentés comme des applications d'ingénierie supportant les processus de gestion de configuration et conduisant donc à un traitement efficace des modifications lors des phases de développement. Dans l'industrie aéronautique, un écart existe pourtant entre les fonctionnalités affichées par les éditeurs et les besoins opérationnels identifiés. Ce constat est en partie à l'origine de ce travail de thèse qui vise à développer des solutions supportant les processus de traitement des modifications chez un avionneur où elles participent directement au pilotage du processus de conception. En effet, puisque le développement d'un nouvel avion repose en partie sur des empilages de modifications auxquels des solutions techniques doivent être apportées alors, par voie de conséquence, toute amélioration du processus de traitement des modifications a une incidence sur les délais ainsi que les coûts de développement même des nouveaux appareils.

Pour répondre à cet objectif, ce projet de recherche s'est déroulé en plusieurs étapes. La première étape porte sur l'étude du contexte du projet, c'est à dire le développement d'un nouvel appareil dans l'industrie aéronautique civile. Elle a consisté à détailler les contraintes et les enjeux associés au développement de ces produits complexes. Cette phase de l'étude a permis de souligner un besoin élémentaire : gérer, pendant les phases de développement, la configuration du produit et son patrimoine informationnel qui se situent au cœur des interactions entre les différents acteurs de l'entreprise étendue.

La synthèse des normes de gestion de configuration a ensuite permis d'aborder le processus de développement de nouveaux produits sous un angle original. La seconde partie de ces travaux a également consisté à étudier les fonctionnalités principales des applications PLM qui supportent ces normes en se focalisant essentiellement sur la maîtrise des modifications.

A partir de ces informations et en se basant sur des modifications traitées par l'avionneur dans le passé, il a été possible d'appréhender le phénomène « modification » dans sa globalité, mais aussi d'identifier les besoins opérationnels élémentaires afin d'aller vers plus de maîtrise. Des pistes de recherche pertinentes pour l'optimisation du processus de traitement des modifications ont été mises en évidence à

dence à partir de ces besoins et de l'étude des contributions scientifiques existantes (principalement issues du domaine de la conception).

Dans ce sens, une proposition de solution a été définie et évaluée. Elle est présentée au chapitre 4. Elle comprend :

- La définition d'un modèle de processus de traitement des modifications pour les phases de développement. C'est un modèle générique qui s'appuie sur la synthèse des normes existantes.
- La définition d'une bibliothèque de processus et des mécanismes de gestion associés permettant de mettre en œuvre un processus de traitement adapté aux caractéristiques de la demande initiale et à son contexte d'émission.
- La définition d'une méthode d'analyse d'impacts permettant de détecter, au plus tôt, d'éventuelles propagations des modifications initiales à l'intérieur d'un système.
- La définition d'une méthode d'évaluation des solutions techniques générées en réponse à une demande de modification selon leurs influences sur les performances du produit, leur exploitation et leur intégration.

Afin d'illustrer cette proposition, un prototype informatique baptisé CM-EC (Collaborative Management of Engineering Changes) a été développé. Le traitement des modifications étant un processus collaboratif, le concept d'espace virtuel partagé a été intégré à ce prototype afin de tirer profit des interactions entre les acteurs. CM-EC a permis d'évaluer les apports ainsi que les limitations de la proposition mais aussi de dégager des perspectives de recherche pour l'avenir.

Si la proposition et l'application CM-EC ne sont pas encore intégrées à un environnement opérationnel, elles fournissent des éléments de réflexion pouvant contribuer à l'évolution d'applications d'ingénierie existantes (telles que les PLM) ainsi qu'à la ré-ingénierie de processus de gestion de configuration.

Bibliographie

- [ACH01] **ACHA V., BRUSONI S., PRENCIPE A.**, *Exploring The Miracle :The Knowledge Base in the Aeronautics Industry* , Deliverable WP2.2 (Sector Case Studies – Aircraft) of the TELL Project (Technological Knowledge and Localized Learning: What Perspectives for a European Policy ?), Contract HPSE-CT2001-00051, 2001.

- [AFN94] **AFNOR**, *Norme X 50-415 : Management des Systèmes - Ingénierie Intégrée – Concepts Généraux et Introduction aux Méthodes d'Application*, 1994.

- [AFN02] **AFNOR**, *Norme X 50-127 : Outils de Management – Maîtrise du Processus de Conception et de Développement*, 2002.

- [AFS62] **AIR FORCE SYSTEMS COMMAND**, *AFSCM 375-1: Configuration Management During the Development & Acquisition Phases*, 1962.

- [AGA02] **AGARD B.**, *Contribution à une Méthodologie de Conception de Produits à Forte Diversité*, Thèse de doctorat en Génie Industriel, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.

- [AIR01a] **AIRBUS**, *Develop new A/C (DnA) – Business Process Definition – Milestones Model*, Airbus Procédure AP2054 Module 1, Document Interne, 2001.

- [AIR01b] **AIRBUS**, *ACMR – Airbus Configuration Management Rules*, Document Interne, 2001.

- [AIR02] **AIRBUS**, *Global Market Forecasts 2001 – 2020*, 2002. Document téléchargeable sur : <http://www.airbus.com/media/gmf.asp> (adresse valide le 17/06/2003).

- [AIR02] **AIRBUS**; *Guide du Processus de Développement Avion : « Concept/Definition Phases » - Conception Préliminaire*, Manuel Métier MM-00060-2.0, Document Interne, 2002.

- [AIR03] **AIRBUS**, *AIRBUS General Press Presentation*, Document interne, 2003.
- [AKA90] **AKAO Y.**, *Quality Function Deployment : Integrating Customer Requirements into Product Design*, Productivity Press, ISBN 0-915299-41-0, 1990.
- [BAN89] **BANNON L.J., SCHMIDT K.**, *CSCW: Four Characters in Search of a Context*, ECSCW '89. Proceedings of the First European Conference on Computer Supported Cooperative Work, Gatwick, London, 13-15 September 1989, pp. 358-372.
- [BEN02] **BENALI K., BOURGUIN G., DAVID B., DERYCKE A., FERRARIS C.**, *Collaboration / Cooperation*, Actes des deuxièmes assises nationales du GDR 13, Décembre 2002, pp79-94.
- [BNA97] **Bureau National de l'Aéronautique et de l'Espace (BNAE)**, *RG AERO 00023 : Management de Programme – Guide pour la Mise en Oeuvre des Principes de la Gestion de Configuration*, 1997.
- [BNA99] **Bureau National de l'Aéronautique et de l'Espace (BNAE)**, *RG AERO 00040 : Recommandation Générale pour la Spécification de Management de Programme*, 1999.
- [BOS97] **BOSSARD P., CHANCHEVRIER C. et LECLAIR P.**, *Ingénierie Concourante : de la Technique au Social*, Editions ECONOMICA, 1997.
- [CAR01] **CARRATT B., EYNARD B., CALM J.F.**, *Concurrent Aviation Certification*, Conférence ESREL01, Turin, Italie, 16-20 septembre 2001.
- [CHA95] **CHARLTON M.L.**, *Product Data Management and its Contribution to Concurrent Engineering*, First AIAA Aircraft Engineering, Technology and Operations Congress, Los Angeles, USA, 1995.
- [CHA99] **F. CHAMBOLLE.**, *Un Modèle Produit Piloté par les Processus d'Elaboration : Application au Secteur Automobile dans l'Environnement STEP*, Thèse de l'Ecole Centrale de Paris, 1999.
- [CHA01] **CHAO L.P., BEITER K.A., ISHII K.**, *Design Process Error Proofing : International Industry Survey and Research Roadmap*, DETC01/DFM-21196, ASME Design Engineering Technical Conferences, September 9-12, 2001, Pittsburgh, USA.
- [CLA87] **CLARK K., CHEW B., FUJIMOTO T.**, *Product Development in the World Auto Industry*, Brookings Paper on Economic Activity, Vol. 3, pp 729-771, 1987.

- [CLA91] **CLARK K., FUJIMOTO T.**, *Product Development Performance. Strategy, Organization and Management in the World Auto Industries*, Harvard Business School, 1991.
- [CLA01] **CLARKSON P.J., SIMONS C., ECKERT C.**, *Predicting Change Propagation in Complex Design*, DETC01/DTM-21698, ASME Design Engineering Technical Conferences, September 9-12, 2001, Pittsburgh, USA.
- [COH98] **COHEN T., FULTON R.E.**, *A Data Approach to Tracking and Evaluating Engineering Changes*, DETC98/EIM-5682, ASME Design Engineering Technical Conferences, September 13-16, 1998, Atlanta, USA.
- [COH97] **COHEN T.**, *A Data Approach to Tracking and Evaluating Engineering Changes*, PhD, Georgia Institute of Technology, 1997.
- [COL00] **COLLAINE A., LUTZ P., LESAGE J.-J.**, *Model of product/production system evolutions by coloured Petri Net*, , Advances in concurrent engineering, CE'2000, Lyon (France), pp. 759-765, July 2000
- [COL01] **COLLAINE A.**, *Une Méthode d'Evaluation de l'Impact des Evolutions du Produit sur le Système de Production et la Performance de l'Entreprise*, Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2001.
- [COU92] **COUGHLAN P.D.**, *Engineering Change and Manufacturing Engineering Deployment in New Product Development*, In Susman G.I. (ed.) Integrating Design and Manufacturing for Competitive Advantage, Oxford University Press, 1992, pp 157-177.
- [DAL82] **DALE B.G.**, *The Management of the Engineering Change Procedure*, Engineering Management International, Vol.1,1982, pp 201-208.
- [DAC01] **DA CUHNA C.**, *Gestion des modifications*, DEA de Génie Industriel, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.
- [DAR01] **DARSES F., DETIENNE F., VISSER W.**, *Assister la Conception : Perspectives pour la Psychologie Cognitive Ergonomique*, EPIQUE 2001, Actes des Journées en Psychologie Ergonomique, Nantes, 29-30 Octobre 2001, pp11-20.
- [DAR02] **DARSES F., FALZON P.**, *La Conception Collective: Une Approche de l'Ergonomie Cognitive*, dans Conception et Coopération, ouvrage collectif sous la direction de De TERSSAC G. et FRIEDBERG E, éditions Octarès, 2001,pp123-135.

- [DOD97] **US Department of Defense (DoD)**, *MIL-HDBK-61- Military Handbook : Configuration Management Guidance*, 1997.
- [ECK01] **ECKERT C.M., ZANKER W., CLARKSON P.J.**, *Aspects of a Better Understanding of Changes*, in proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Glasgow, August 21-23, 2001, pp147-154.
- [EGE03] **EGER T., ECKERT C.M., CLARKSON P.J.**, *Towards a Change Process Planning Tool*, in proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), Stockholm, August 19-21, 2003.
- [EIA98] **American National Standards Institute (ANSI) / Electronic Industrie Alliance (EIA)**, *ANSI/EIA 649 : National Consensus Standard for Configuration Management*, 1998.
- [ELL91] **ELLIS C., GIBBS S., REIN G.**, *Groupware - Some Issues and Experiences*, Communication of the ACM, vol. 34, no. 1, pp. 38-58, 1991.
- [ELL94] **ELLIS C., WAINER J.**, *A Conceptual Model of Groupware.*, proceedings of ACM Computer Supported Cooperative Work (CSCW'94), 1994, pages 79-88, ACM Press.
- [FER98] **FERU F., VIEL C.**, *Echanger avec le Protocole d'Application 203 de STEP. Echange et Partage de Données CAO et GDT*, Association GOSET, Nanterre, ISBN: 2-9513382-0-1, 1998.
- [FRA03] **FRANKENBERGER E.**, *Technology Development and Future Aircraft Design as a Methodical Challenge*; Proceeding of the International Conference on Engineering Design (ICED'03), Stockholm, August 19-21, 2003.
- [FRI00] **FRICKE E., GEBHARD B., NEGELE H, IGENBERGS E.**, *Coping with changes – Causes, findings and strategies*, Journal on Systems Engineering, Vol. 3, N° 4, Wiley & Sons, 2000.
- [FRI01] **FRIGANT V., TALBOT D.**, *Proximités et Logique Modulaire dans l'Automobile et l'Aéronautique : vers une Convergence des Modèles d'Approvisionnement*, Troisièmes Journées de la Proximité – « Nouvelles Croissances et Territoires », Paris, Décembre 2001.
- [GIN02] **GINO F.**, *Complexity Measures in Decomposable Product Structures*, présentation faite à la deuxième conférence annuelle Innovative Research in Management (EURAM 2002), The European Academy of Management, Stockholm – Suède, 9-11 Mai 2002.

- [GOL00] **GOLTZ M., GRIGOROVA K., BOOR F., PALOTAI R.,** *CONFLOW : Final Project Report*, Project n° 960243 under the INCO-Copernicus "Programme, 2000.
- [GOP01] **GROUP OF EXPERTS,** *European Aeronautics : a vision for 2020*, European Commission, ISBN 92-894-0559-7, 2001.
- [HAN01] **HANSEN C.T., RIITAHUHTA A.,** *Issues on the Development and Application Tools to Support Product Structuring and Configuring*, International Journal of Technology Management, Vol. 21, N°3/4, 2001.
- [HOB98] **HOBDAY M.,** *Product Complexity, Innovation and Industrial Organisation*, Research Policy, Vol. 26, 1998, pp689-710.
- [HOO95] **HOOGSTOEL F.,** *Une Approche Organisationnelle du Travail Coopératif Assisté par Ordinateur. Application au Projet Co-Learn*, Thèse en Informatique, Université des Sciences et Technologies de Lille., 1995.
- [HUA98] **HUANG G.Q., MAK K.L.,** *Computer Aids for Engineering Change Control*, Journal of Materials Processing Technology, N°76, 1998, pp 187-191.
- [HUA99] **HUANG G.Q, MAK K.L.,** *Current Practices of Engineering Change Management in UK Manufacturing Industries*, International Journal of Operations Management, Vol.19, N°1, 1999, pp 21-37.
- [HUA01] **HUANG G.Q, YEE W.Y., MAK K.L.,** *Re-engineering the Engineering Change Management Process*, Proceedings of the 7th International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Lyon, France, July 17-20 2000, pp 255-264.
- [HUG01] **HUGUES E., FERU F., RIVIERE A., TAFARO S.,** *Des Interfaces pour Améliorer les Performances d'Exploitation d'un Système d'Information Complexe*, NI-MESTIC 2001, Nîmes, France, 2001.
- [HSU96] **HSU T.C.,** *Causes and Impacts of Class I Engineering Changes: an Engineering Study Based on Three Defense Aircraft Acquisition Programs*, MSc in Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [ICA01] **ICAO (International Civil Aviation Organization),** *Annual Review of Civil Aviation*, Vol.56 n°6, 2001, pp 10-36.
- [IDA88] **WINNER R.I., PENNELL J.P., BERTREND H.E., SLUSARZUCK M.M.G.,** *The Role of Concurrent Engineering in Weapons System Acquisition*, IDA Report R-338, Institute for Defense Analyses, 1988.

- [ISH93] **ISHII H., KOBAYASHI M., GRUDIN J.,** *Integration of Interpersonal Space and-Shared Workspace: Clearboard Design and Experiments*, ACM Transactions on Information Systems, 11(4), pp349-375, 1993.

- [ISO95] **International Standard Organisation (ISO),** *ISO 10007 : Management de la qualité – Lignes directrices pour la gestion de configuration*, 1995.

- [ISO98] **International Standard Organisation (ISO),** *ISO 14000 : Management environnemental*, 1998.

- [JAR02] **JARRATT T.A.W., CLARKSON P.J., PARKS G.T., ECKERT C.,** *Use of Monte Carlo Methods in the Prediction of Change Propagation*, in Engineering Design Conference 2002 (EDC'02), King's College, London, 1, pp487-498.

- [KID00] **KIDD M.W., THOMPSON G.,** *Engineering Design Management*, in Integrated Manufacturing Systems, Vol.11,n°1, 2000, pp 74-77.

- [KLA81] **KLANSNIC J.E., DITTENBERGER R.J.,** *Boeing 757 / 767 Commonality Design Philosophy*, SAE Technical Paper Series, n°810845, 1981.

- [LAU02] **LAURILLAU Y.,** *Conception et Réalisation Logicielles pour les Collecticiels Centrées sur l'Activités de Groupe : le Modèle et la Plate-Forme CLOVER*, Thèse de Doctorat en Informatique de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, Septembre 2002.

- [LEG03] **LEGARDEUR J., MERLO C., FRANCHISTEGUY I., BAREINGTD C.,** *Coordination et Cooperation dans le Processus de Conception*, Conférence PRIME-CA, La Plagne, 2003.

- [LIN98] **LINDEMANN U., KLEEDORFER R., GERST M.,** *The Development Department and Engineering Change Management*, in Designers – The key to successful product Development, Springer, 1998, pp169-182.

- [LOC99] **LOCH C.H., TERWIESCH C.,** *Accelerating the Process of Engineering Change Orders: Capacity and Congestion Effects*, in Journal of Product Innovation Management, Vol.16, N°2, 1999, pp145-169.

- [MA03] **MA S., SONG B., LU W.F., ZHU C.F.,** *A Knowledge-Supported System for Engineering Change Impact Analysis*, DETC2003/DAC-48749, ASME Design Engineering Technical Conferences, September 2-6, 2003, Chicago, USA.

- [MAL96] **MALMQVIST J., AXELSSON R., JOHANSSON M.,** *A Comparative Analysis of the Theory of Inventive Problem Solving and the Systematic Approach of Pahl*

- and Beitz*, DETC1996/DTM-1529, ASME Design Engineering Technical Conferences, August 18-22, 1996, Irvine, USA.
- [MAR00a] **MARTIN M.V., ISHII K.**, *Design for Variety: A Methodology for Developing Product Platform Architectures*, DETC2000/DFM-14021, ASME Design Engineering Technical Conferences, September 10-13, 2000, Baltimore, USA.
- [MAR00b] **MARTIN C., DJEAPRAGACHE, BOCQUET J-C.**, *Amélioration de la gestion du processus de conception à travers les méthodes dans le cadre de la conception Intégrée*. European Journal of Automation, 34: p. 237-246, avril 2000.
- [MAR01] **MARTIN G.**, *Intégration et Confrontation des Points de Vue dans le Cadre de la Conception en Ingénierie Concourante*, Thèse de doctorat en Ergonomie, Conservatoire National des Arts et Métiers, 2001.
- [MAU96] **MAURINO M.**, *La Gestion des Données Techniques, la Technologie du Concurrent Engineering*, Collection « Organisation Industrielle », Masson, 1996.
- [MCC93] **McCORD K. R., EPPINGER S. D.**, *Managing the Integration Problem in Concurrent Engineering*, M.I.T. Sloan School of Management, Cambridge, MA, Working Paper no.3594, 1993.
- [MES02] **MESIHOVIC S., MALMQVIST J, PIKOSZ P**, *Product Data Management (PDM) Systems Based Support for Engineering Project Management*, Proceeding of TMCE'02, Wuhan, Chine, 2002.
- [MIL93] **MILES V.C., MCCARTHY J.C., DIX A.J., HARRISON M.D., MONK A.F.**, *Reviewing Designs for a Synchronous-Asynchronous Group Editing Environment*, In Sharples M., Editor, Computer Supported Collaborative Writing, pp137-160, Springer-Verlag, London, 1993.
- [MIT03] **MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT) & UNIVERSITY OF ILLINOIS**, site web : <http://www.dsmweb.org/> , site valide le 27/11/2003.
- [MOR99] **MORTENSEN N.H., HANSEN C.T.**, *Structuring as a Basis for Product Modeling*, in Critical Enthusiasm – Contributions to Design Science, ISBN 82-91917-08-6, pp 111-128, 1999.
- [MUL88] **MULLER P.**, *Airbus: l'Ambition Européenne, Logique d'Etat, Logique de Marché*, Collection « Logiques Sociales », éditions L'Harmattan, 1988.
- [MUR00] **MURMAN E.M., MYLES W., REBENTISCH E.**, *Challenges in the Better, Faster, Cheaper Era of Aeronautical Design, Engineering and Manufacturing*, The

- Lean Aerospace Initiative, report n°RP00-02, Massachusetts Institute of Technology; September 2000.
- [NYB00] **NYBERG T. JOAO M.** *Late Engineering Changes*, Master of Science n°2000-283; Luleå University of Technology, Sweden, 2000.
- [OLL01] **OLLINGER G.A., STRAHOVITCH T.F.** *REDESIGNIT – A Constraint-Based Tool for Managing Design Changes*, DETC2001/DTM-21702, ASME Design Engineering Technical Conferences; September 9-12, 2001, Pittsburgh, USA.
- [OSC03] **OSCAR**, *Projet OSCAR : Outils Supports pour la Capitalisation d'Analyses et leur Réutilisation*, projet régional financé par la région Rhône-Alpes, 2001-2003.
- [PAP01] **PAPAZOGLU J.Y.**, *La Démarche Concurrent Engineering pour le Développement des Nouveaux Airbus*, Conférence C5, MICADO 2001, Paris, 2001.
- [PEN98] **PENG T.K., TRAPPEY A.J.C.**, *A Step Toward STEP Compatible Engineering Data Management: the Data Models of Product Structure and Engineering Changes*, Journal of Robotics and Computer – Integrated Manufacturing, Vol.14, 1998, pp 89-109.
- [PET91] **PETIT E.**, *Nouvelle Histoire Mondiale de l'Aviation*, éditions ALBIN MICHEL, 1991.
- [PIK96] **PIKOSZ P., MALMQVIST J.**, *Possibilities and Limitations When Using PDM Systems to Support the Product Development Process*, NORD DESIGN'96 Conference, Espoo, Finland, 1996.
- [PIK97] **PIKOSZ P., MALMSTRÖM J., MALMQVIST J.**, *Strategies for Introducing PDM Systems in Engineering Companies*, Advances in Concurrent Engineering 97, Rochester, USA, 1997, pp 425-434.
- [PIK98] **PIKOSZ P., MALMQVIST J.**, *A Comparative Study of Engineering Change Management in three Swedish Engineering Companies*, DETC98/EIM-5684, ASME Design Engineering Technical Conferences, September 13-16, 1998, Atlanta, USA.
- [PRE03] **PRENCIPE A., DAVIS A., HOBDAY M.**, *The Business of Systems Integration*, Ouvrage Collectif, Oxford University Press, ISBN 0 -19-926322-1, 2003.
- [RIN98] **RING J., FRICKE E.**, *Rapid Evolutions of all your Systems – Problem or Opportunity*, Proceedings of the IEEE 17th Digital Avionics Systems System Conference, Seattle, 1998.

- [RIV02] **RIVIERE A, FERU F., TOLLENAERE M.,** *Prediction of Engineering Changes in Complex Systems*, proceedings of the 3rd European Systems Engineering Conference, Toulouse, France, 2002, pp335-339.

- [RIV03] **RIVIERE A., DA CUNHA C., TOLLENAERE M.,** *Performances in Engineering Change Management*, in Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, edited by G. GOGU, D. COUTELLIER, P.CHEDMAIL and P. RAY, KLUWER Academic Publisher, ISBN1-4020-1163-6, 2003, pp369-378.

- [ROB91] **Petit ROBERT,** *Dictionnaire de la Langue Française*, 1991.

- [ROU03a] **ROUIBAH K., CASKEY K.R.,** *Change Management in Concurrent Engineering from a Parameter Perspective*, Computers in Industry, Vol.50, n°1, January 2003, pp15-34.

- [ROU03b] **ROUIBAH K.,** *Managing Concurrent Engineering Across Company Borders: a Case Study*. 36th Hawaii International Conference On System Sciences (HICSS-36), IEEE Computer Society Press, January 6-9, 2003, Hawaii, pp. 1-11.

- [SAL95] **SALBER D.,** *De l'Interaction Individuelle aux Systèmes Multi-Utilisateurs. L'exemple de la Communication Homme-Homme-Médiatisée*. Thèse de doctorat Informatique, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, Septembre 1995.

- [SCH02a] **SCHEIBLE R.S.,** *Airbus Concurrent Engineering*, ENHANCE Project, Forum 3, 2002.

- [SCH02b] **SCHMIDT K.,** *The Problem with 'Awareness'. Introductory Remarks on 'Awareness in CSCW*, in Computer Supported Cooperative Work Journal, Vol. 11: 285–298, 2002.

- [SCH92] **SCHMIDT K., BANNON L.,** *Taking CSCW Seriously : Supporting Articulation Work*, Computer Supported Cooperative Work (CSCW): An International Journal, vol. 1, no. 1, pp. 7-40, 1992.

- [SCH97] **SCHLICHTER J., KOCH K., BURGER M.,** *Workspace Awareness for Distributed Teams*, Proc. Coordination Technology for Collaborative Applications - Organizations, Processes, and Agents (Wolfram Conen, Gustaf Neumann eds.), Springer Verlag, Berlin, pp. 199-218, Singapore, 1997

- [SHI94] **SHIGERU M., AKAO Y.**, *QFD : The Customer Driven Approach to Quality Planning and Deployment*, Asian Productivity Organization, ISBN 92-833-1122-1, 1994.
- [SMI97] **SMITH R.P., EPPINGER S.**, *A Predictive Model of Sequential Iterations in Engineering Design*, Management Science, Vol. 43 N°8, 1997.
- [SOS03] **SOSA E., EPPINGER S., ROWLES C.**, *Identifying Modular and Integrative Systems and Their Impact on Design Team Interactions*, ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 125, June 2003, pp 240-252.
- [STA98] **STAKE R.B., BLACKENFELT M.**, *Modularity in Use: Experiences from Five Companies*", Presented at the 4th WDK Workshop on Product Structuring, 1998.
- [STE81] **STEWART D. V.**, *The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems*, IEEE Transactions on Engineering Management. vol. 28, pp.71-74, 1981.
- [SUT02] **SUTINEN K., ALMEFELT L., MALMQVIST J.**, *Supporting Concept Development Using Quantitative Requirements Traceability*, 12th International Symposium INCOSE 2002, Las Vegas, USA.
- [TAL01] **TALBOT D.**, *Proximités et Dynamiques des Relations de Sous-Traitance :le Cas d'EADS Airbus à Toulouse*, Colloque de l'Association Française de Comptabilité, Metz, Mai 2001.
- [TER97] **TERWIESCH C., LOCH C.H.**, *Management of Overlapping Development Activities : A Framework for Exchanging Preliminary Information*, Proceedings of the 4th EIASM Conference on Product Development, pp 797-812, 1997.
- [TER99] **TERWIESCH C., LOCH C.H.**, *Managing the Process of Engineering Change Orders: the Case of the Climate Control System in Automobile Development*, in Journal of Product Innovation Management, Vol.16, N°2, 1999, pp160-172.
- [TIC95] **TICHKIEWITCH S., CHAPA E., BELLOY P.**, *Un Modèle Produit Multi-Vues pour la Conception Intégrée*, International Industrial Engineering Conference, Montréal, Canada,1995.
- [THO97] **THOMPSON S.M.**, *Configuration Management – Keeping it all Together*, BT Technology Journal, Vol. 15, Issue 3; 1997, pp48-60.

- [TOL91] **TOLLENAERE M.**, *Application de l'Intelligence Artificielle à la Conception Mécanique : un Exemple, les Blocs Forés Hydrauliques*, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Avril 1991.

- [TOL92] **TOLLENAERE M.**, *Quel Modèle Produit pour concevoir ?*, Symposium Design in 2000 and beyond, Tools and technologies, Strasbourg, Edition du Centre National d'Etudes Spatiales, pp 331 – 340, Novembre 1992.

- [ULR95] **ULRICH K.**, *The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm*, in Research Policy, Vol.24, 1995, pp 419-440.

- [USI03] **USINE NOUVELLE**, *L'Aéronautique s'Adapte au Manque de Visibilité*, n° 2874, juin 2003, pp 12-14.

- [USM88] **US Military Standard 480B**, *Configuration control – Engineering changes, deviations, and waivers*, section 3.1.30, July 1988.

- [WAT84] **WATTS F.**, *Engineering Changes : A Case Study*”, in Production and Inventory Management Journal, Vol.25, Part. 4, pp 55-62.

- [WEN97] **WENZEL S., BAUCH T., FRICKE E., NEGELE H.**, *Concurrent Engineering and More – A Successful Approach to Successful Product Development*, Proceedings of the 7th International Symposium of INCOSE, Los Angeles, 1997.

- [WOM90] **WOMACK J.P., JONES D.T., ROOS D.**, *The Machine That Changed the World*, Harper Perennial, New York, 1990.

Annexes

1 Illustration des liens enrichissant les modèles produits

L'illustration que nous proposons est basée sur le cas aéronautique suivant : le piping Trim Tank et APU (Auxiliary Power Unit) dans la section 15/21 (Cf. Figure suivante).

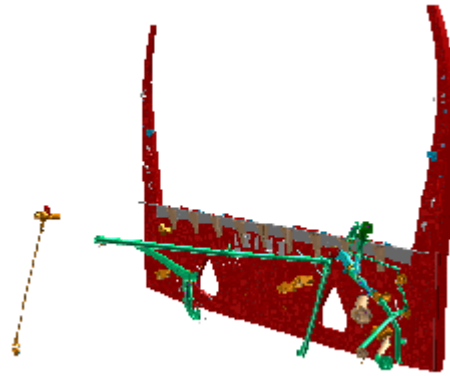


Figure 61 : Piping Trim Tank dans la section 15/21

Si le modèle Figure 61, représente le modèle final, il faut prendre en compte que durant les phases de conception et les phases de fabrication ce ne sont pas les mêmes vues du produit qui sont exploitées. En effet, les éléments de tuyauterie sont conçus d'un seul bloc et cheminent sur la totalité de l'avion alors qu'un découpage doit être effectué pour la fabrication sur les différents sites industriels du constructeur. Cette vue est généralement appelée « As Designed » durant les phases de conception et « As Planned » durant les phases de fabrication et d'assemblage. Une illustration de ces deux vues est fournie par les figures suivantes

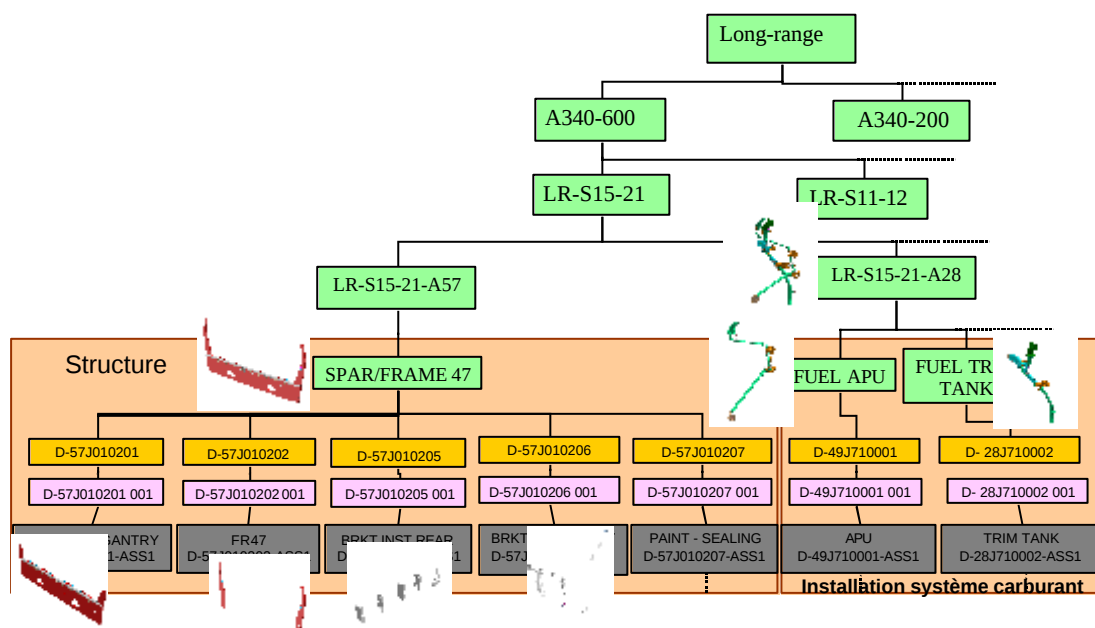


Figure 62 : Vue "As Designed"

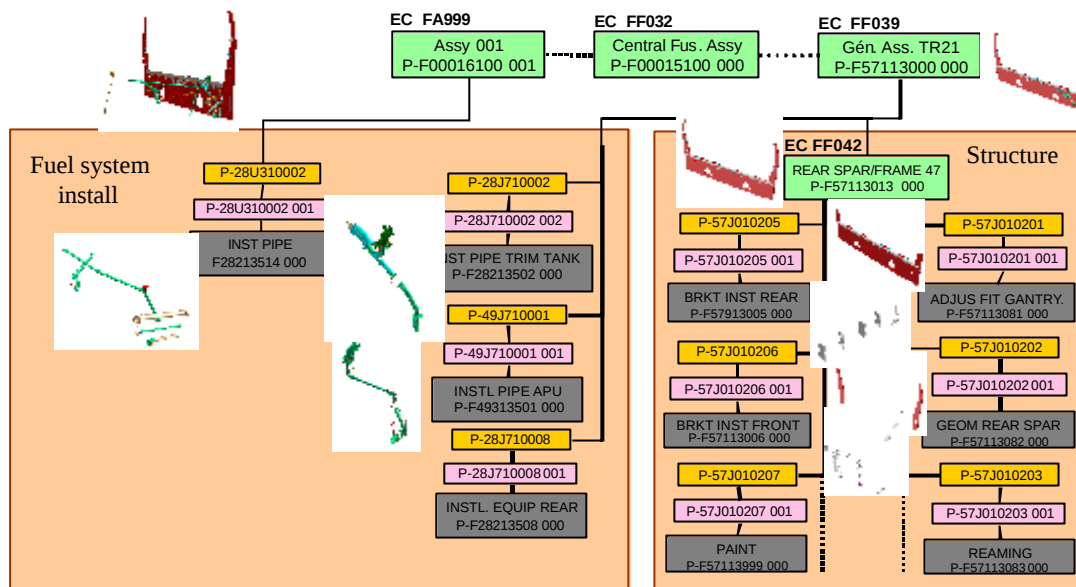


Figure 63 : Vue "As Planned"

1.1 Liens de composition

Dans les modèles implémentés dans les applications PLM, ces liens existent, ils représentent les contraintes d'assemblage. Si l'on se reporte à un ensemble particulier de l'exemple utilisé (Cf. Figure suivante), ces liens sont représentés en noir. Ils indiquent que la modification d'un élément peut impliquer la modification de son ensemble supérieur ou celle des composants se situant à un niveau inférieur.

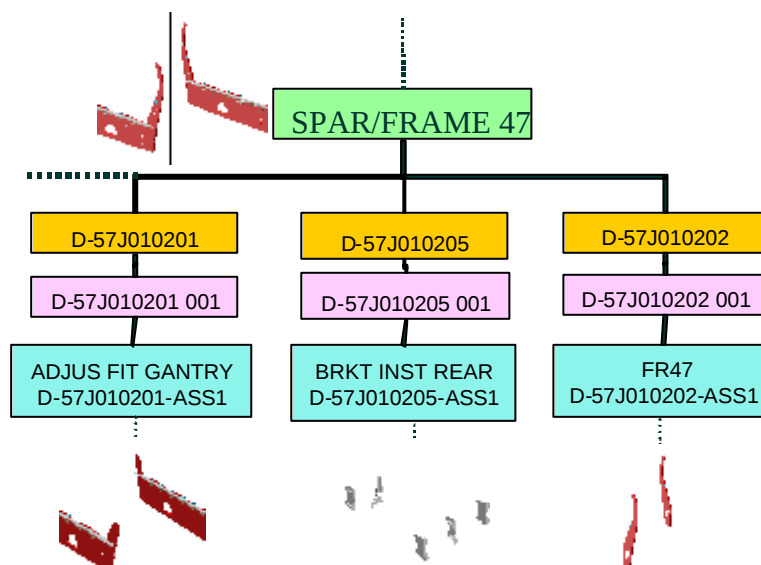


Figure 64 : Liens de composition

1.2 Les liens d'association

Il existe obligatoirement des correspondances entre les vues de conception et de fabrication. Ces correspondances se font au travers des liens d'association qui unissent les ensembles et les composants des deux vues. En effet, la modification de la conception d'un élément induit très souvent une modification de l'élément auquel il est associé dans la vue de fabrication. L'effet inverse est également vrai. Ces liens sont représentés en noir sur la figure suivante.

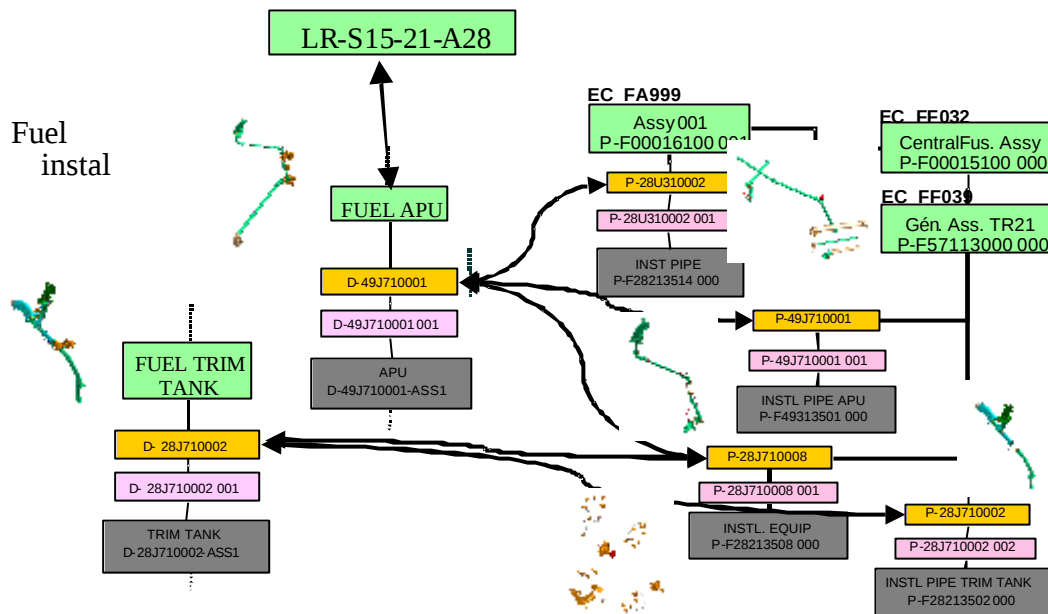


Figure 65 : Les liens d'association

1.3 Les liens de positionnement

Les liens de positionnement permettent de gérer, en cas de modification, les interférences potentielles entre deux composants. Ces interférences dépendent en grande partie de la géométrie, du positionnement et des modes d'assemblage des composants. Si la maquette numérique permet de manipuler ce type d'informations, les modèles de produits ne contiennent pas toujours ce type d'informations de manière intrinsèque. L'exemple suivant montre l'interface qui existe entre les éléments de tuyauteries et la structure sur laquelle ils doivent être montés.

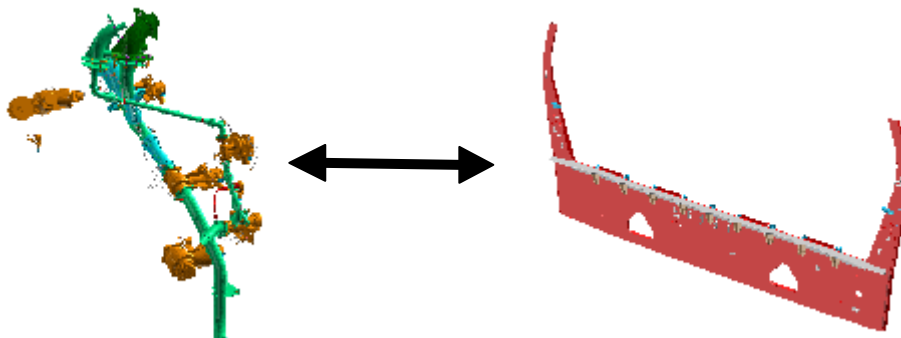


Figure 66 : Les liens de positionnement

1.4 Les liens de dimensionnement

Les liens de dimensionnement permettent d'établir une dépendance entre les caractéristiques et les attributs de deux composants ou ensembles de composants. Ainsi, lorsque la caractéristique d'un composant est modifiée, les attributs d'autres composants auxquels il est lié sont également susceptibles d'évoluer. Si l'on se reporte à l'exemple de la figure suivante, il est possible d'affirmer que les diamètres des tuyauteries sont liés aux caractéristiques des électro-vannes.

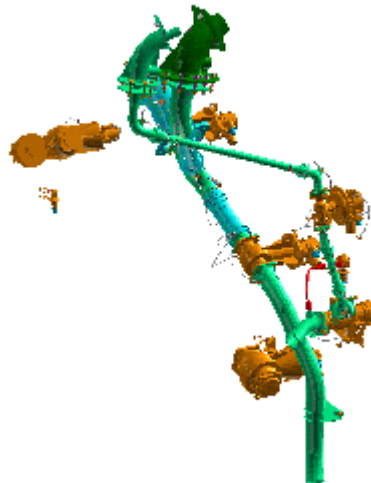


Figure 67 : Liens de dimensionnement

1.5 Les liens de dépendance organisationnelle

Les liens de dépendance organisationnelle permettent d'appréhender les contraintes organisationnelles lors du traitement des modifications. Dans l'entreprise étendue, l'une des stratégies est de cantonner les modifications à des ensembles sous la responsabilité d'un seul partenaire et d'éviter qu'elles se propagent vers d'autres entités de l'organisation. Ces informations doivent être contenues dans les modèles produits. Si l'on se reporte à la Figure 61 illustrant la vue «As planned», les tuyauteries qui parcourent l'avion ne peuvent pas être fabriquées d'un seul tenant mais par les entités responsables de l'assemblage de chaque tronçon de l'avion. La modification apportée par une de ces entités sur la partie du cheminement dont il est responsable peut avoir des répercussions sur des éléments de tuyauteries situés dans d'autres sections de l'appareil, d'où une complexification de la gestion de ces évolutions.

1.6 Les liens de dépendance fonctionnelle

Les systèmes qui composent un avion participent à la réalisation d'une ou plusieurs fonctions. La modification d'un système par rapport à une fonction à laquelle il participe ne doit pas altérer les autres fonctions qu'il supporte. Des liens de dépendance fonctionnelle doivent donc être établis dans les modèles produits.

2 Diagramme de classe de l'application CM-EC

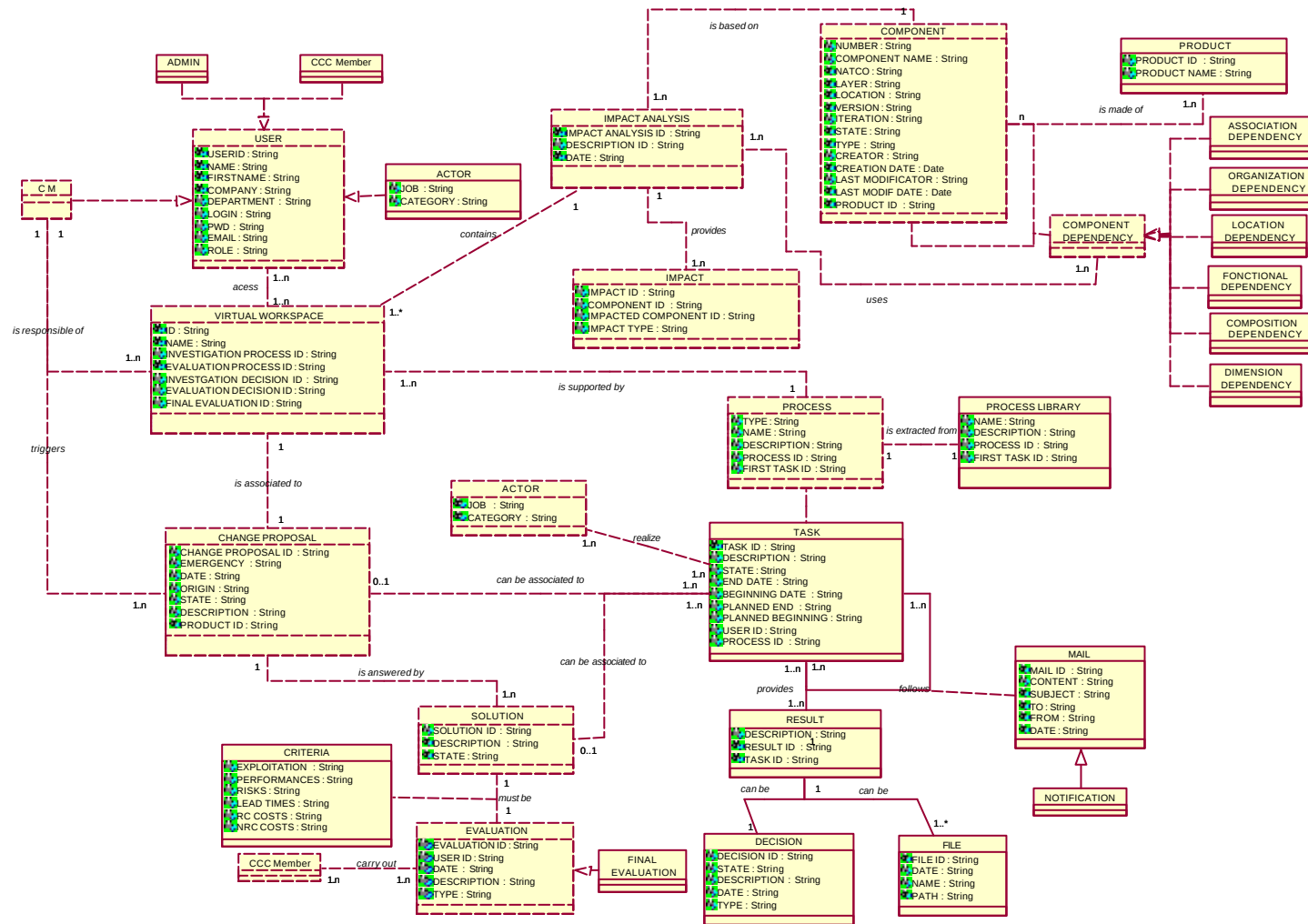


Figure 68 :Diagramme de classe de l'application CM-EC

2 Modèles de navigation

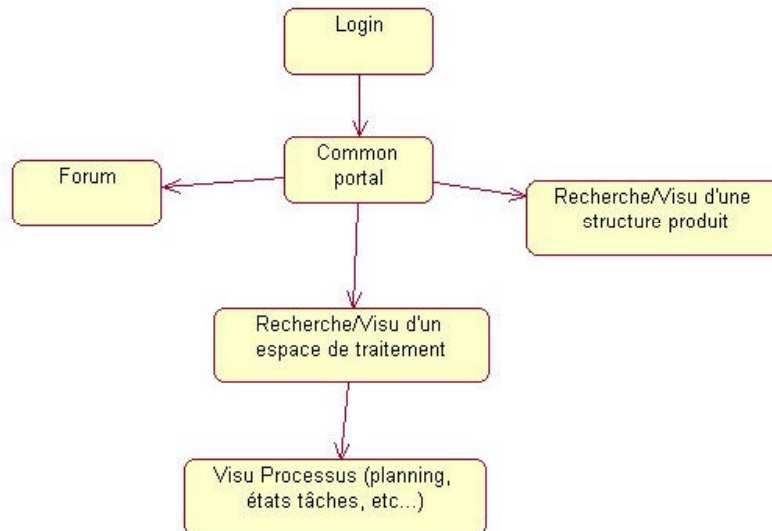


Figure 69 : Modèle de navigation commun à l'ensemble des rôles

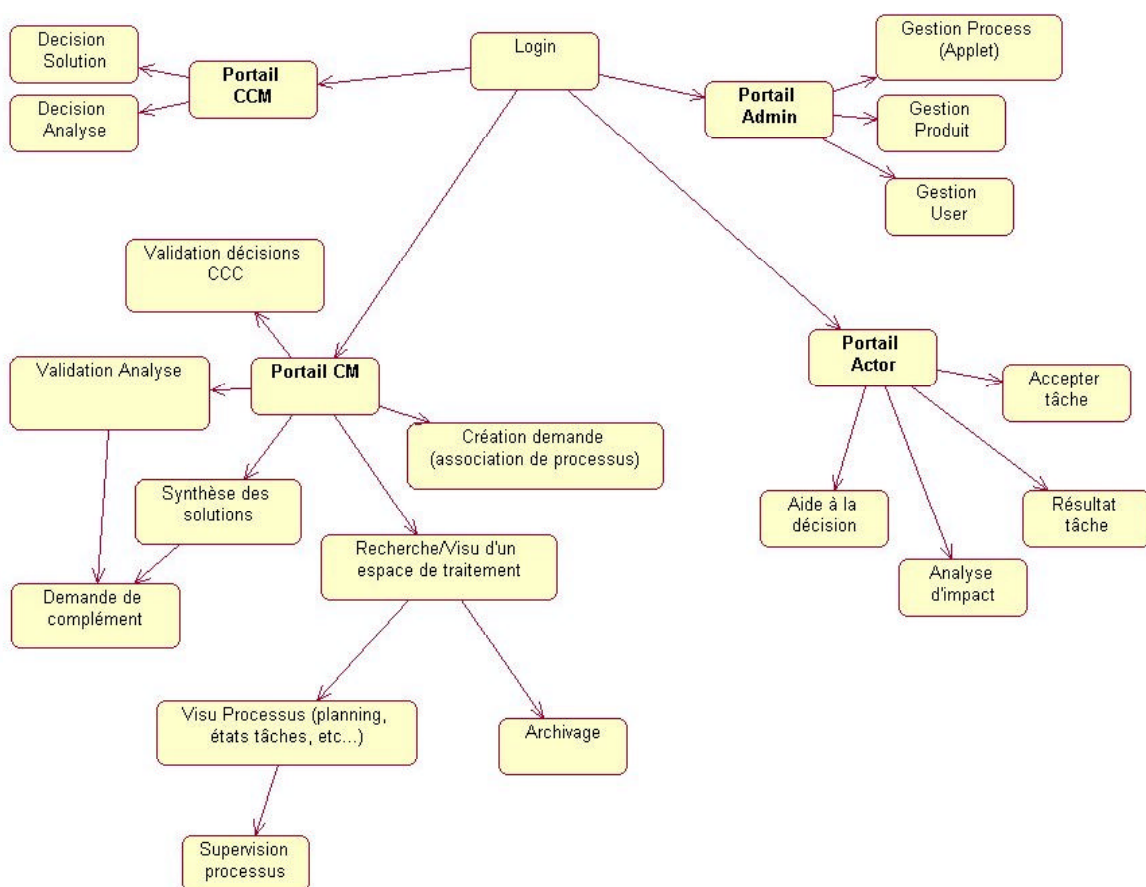


Figure 70 : Modèle de navigation pour les autres rôles de l'application