



THÈSE

Présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

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

Par

Manuel GONÇALVES

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Mécanique et ingénierie

**Formalisation des transferts de spécifications projet dans le cycle
de conception de produits manufacturés : application à un
environnement de type Produit-Processus-Organisation**

Directeur de recherche : Philippe GIRARD

Co-encadrement : Denis TEISSANDIER

Soutenue le 13 décembre 2010 après avis de :

M. EYNARD Benoît
M. NOËL Frédéric

Enseignant Chercheur, HDR, UTC (Compiègne)
Professeur, INP Grenoble

Rapporteur
Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

M. BOURAS Abdelaziz
M. EYNARD Benoît
M. NOËL Frédéric
M. NADEAU, Jean-Pierre
M. VALLESPER Bruno
M. GIRARD Philippe
M TEISSANDIER Denis

Professeur, Université Lumière Lyon 2
Enseignant Chercheur, HDR, UTC (Compiègne)
Professeur, INP Grenoble
Professeur, Arts & Métiers ParisTech, Bordeaux
Professeur, Université Bordeaux 1
Professeur, IUFM d'Aquitaine
Maître de Conférences, Université Bordeaux 1

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité

Table des matières

Chapitre 1	Introduction	11
1.1	Objectifs et enjeux	11
1.2	Contexte de l'étude	13
1.3	Terminologie	15
1.4	Problématique	17
1.5	Plan de lecture	19
Chapitre 2	Modélisation pour la conception collaborative	23
2.1	Les modèles de Conception Assistée par Ordinateur (CAO)	25
2.2	Modélisation produit/processus de conception	26
2.2.1	Modélisation du produit basée sur les flux d'énergie	27
2.2.1.1	Modèle produit orienté fonctions	27
2.2.1.2	Modèle produit support à la conduite du processus de conception	29
2.2.2	Modèle processus associé aux modèles produit basé sur les flux d'énergie	30
2.2.2.1	Modèle processus à base de graphes « Etat-Transition »	30
2.2.2.2	Réseaux GRAI R&D	31
2.2.3	Synthèse	31
2.2.4	Modélisation du produit par domaines	33
2.2.4.1	Modèle produit multivue	33
2.2.4.2	Modèle produit pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances	34
2.2.5	Modélisation du processus associée aux modèles produit par domaines	36
2.2.5.1	Modèle graphe du processus de conception	36
2.2.5.2	Modèle processus pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances	37
2.2.6	Synthèse	38
2.3	Modélisation produit/processus de conception intégrant les ressources	39
2.3.1	Modèle FBS-PPRE	39
2.3.1.1	Origines du concept FBS	39
2.3.1.2	Présentation du modèle FBS-PPRE	39
2.3.2	Modèle PPO	42
2.3.2.1	Modèle de référence	43
2.3.2.2	Modèles intégrés dans le cadre du projet IPPOP	44
2.3.3	Synthèse	46
2.4	Conclusion	47
Chapitre 3	Description de l'environnement PPO support à la traçabilité des données d'un projet	51
3.1	Modèle organisation	52
3.1.1	Modèle de référence	52
3.1.1.1	Système technologique	52
3.1.1.2	Système décisionnel	53
3.1.1.3	Synthèse	53
3.1.2	Structure GRAI-R&D	54
3.1.2.1	Plan action	55
3.1.2.2	Plan objet	55
3.1.3	Entités de la grille GRAI R&D	56

3.1.3.1	Centres de décision	56
3.1.3.2	Centres de conception	57
3.1.3.3	Cadres de décision	57
3.1.3.4	Cadres de conception	57
3.1.4	Synthèse	58
3.2	Modèles processus	59
3.2.1	Deux modèles processus	59
3.2.1.1	Modèle processus de décision	60
3.2.1.2	Modélisation des activités d'ingénierie	60
3.2.2	Activités des modèles processus	61
3.2.2.1	Activité de décision	61
3.2.2.2	Activité d'exécution	62
3.2.2.3	Activité de conception	63
3.2.3	Transformations sur les activités des modèles processus	64
3.2.3.1	Déclenchement d'une activité	64
3.2.3.2	Succession des activités	65
3.2.3.3	Opérations de divergence et de convergence en ET et en OU	65
3.2.3.4	Itération d'une activité	66
3.2.3.5	Cas particulier de l'agrégation d'activités	67
3.2.4	Synthèse	67
3.3	Modèle produit	68
3.3.1	Description du modèle produit	68
3.3.1.1	Entités de base	68
3.3.1.2	Attributs des entités de base	69
3.3.1.3	Liens entre les entités	70
3.3.2	Transformations sur les entités du modèle produit	70
3.3.2.1	Décomposition	70
3.3.2.2	Agrégation	71
3.3.3	Correspondance entre le modèle produit et les outils et modèles utilisés en conception	72
3.3.3.1	Diagramme pieuvre	72
3.3.3.2	FAST (Function Analysis System Technique)	73
3.3.3.3	Modélisation cinématique	74
3.3.4	Synthèse	75
3.4	Conclusion	76
Chapitre 4 Déploiement des transferts de spécifications dans un environnement PPO		79
4.1	Des spécifications aux indicateurs de performance	80
4.1.1	Spécifications dans le cycle de conception	82
4.1.1.1	Spécifications géométriques	83
4.1.1.2	Spécifications produit	85
4.1.1.3	Spécifications projet	86
4.1.2	Indicateurs de performance	87
4.1.2.1	Indicateurs de performance techniques	87
4.1.2.2	Indicateurs de performance projet	88
4.2	Transferts de spécifications	88
4.2.1	Transferts de spécifications géométriques	88
4.2.1.1	Transfert interniveaux de spécifications géométriques	89
4.2.1.2	Transfert intervues de spécifications géométriques	90
4.2.2	Formalisation des mécanismes de transferts	92
4.2.2.1	Transfert interniveaux	92
4.2.2.2	Transfert intervues	94
4.2.3	Problématique de l'agrégation des spécifications	96
4.3	Déploiement des transferts de spécifications dans un environnement PPO	97
4.3.1	Description du transfert dans le système décisionnel	97
4.3.1.1	Mise en œuvre dans la structure GRAI R&D	97

4.3.1.2	Mise en œuvre dans les réseaux GRAI _____	100
4.3.2	Description du transfert entre le système décisionnel et le système technologique _____	101
4.3.3	Description du transfert dans le système technologique _____	102
4.3.3.1	Mise en œuvre dans le modèle produit issu d'IPPOP _____	102
4.3.3.2	Mise en œuvre dans les réseaux GRAI R&D _____	105
4.4	Conclusion _____	107
Chapitre 5	Transfert de spécifications dans un scénario de conception de turbine haute pression _____	111
5.1	Description du scénario _____	113
5.1.1	Evolution du modèle produit _____	114
5.1.1.1	Description de l'état initial du modèle produit : état 0 _____	114
5.1.1.2	Décomposition structuro-fonctionnelle du modèle produit : état 1 _____	114
5.1.1.3	Corrélation des fonctions vis-à-vis des vues métiers : état 2 _____	116
5.1.1.4	Déploiement des transferts de spécifications interniveaux et intervues : état 3 _____	117
5.1.1.5	Récupération des informations provenant du bureau des méthodes : état 4 _____	121
5.1.1.6	Choix de solutions d'architectures : état final 5 _____	122
5.1.1.7	Conclusion _____	122
5.1.2	Evolution du processus de conception dans le bureau d'études et le bureau des méthodes _____	122
5.1.2.1	Activité de conception dans le bureau d'études _____	125
5.1.2.2	Première activité d'exécution dans le bureau d'études _____	125
5.1.2.3	Deuxième activité d'exécution dans le bureau d'études _____	126
5.1.2.4	Activité de décision dans le bureau d'études _____	126
5.1.2.5	Conclusion _____	127
5.1.3	Evolution du processus de décision _____	128
5.1.3.1	Activité d'exécution _____	130
5.1.3.2	Première activité de décision _____	130
5.1.3.3	Seconde activité de décision _____	130
5.1.3.4	Conclusion _____	131
5.1.4	Description de l'environnement organisationnel _____	131
5.1.4.1	Description générale de la grille GRAI R&D associée au scénario _____	131
5.1.4.2	Description du centre de décision associé au bureau d'études au niveau tactique _____	132
5.1.4.3	Transfert de spécifications intervues entre le centre de décision et le centre de conception 133	
5.1.4.4	Transfert intervues de spécifications projet entre centres de décision _____	134
5.1.4.5	Transfert interniveaux de spécifications projet entre centres de décision _____	134
5.1.5	Conclusion _____	135
5.2	Simulations de perturbations _____	136
5.2.1	Perturbation de type technique dans le bureau d'études _____	138
5.2.1.1	Apparition de la perturbation _____	138
5.2.1.2	Résolution d'un problème issu d'une perturbation technique dans le bureau d'études _____	138
5.2.2	Autre perturbation technique dans le bureau des méthodes _____	139
5.2.2.1	Apparition de la perturbation _____	139
5.2.2.2	Résolution d'un problème issu d'une perturbation technique dans le bureau des méthodes _____	140
5.2.3	Perturbation de type processus dans le bureau d'études _____	141
5.2.3.1	Apparition de la perturbation _____	141
5.2.3.2	Résolution d'un problème issu d'une perturbation de type processus _____	142
5.2.4	Perturbation organisationnelle dans le bureau d'études _____	142
5.2.4.1	Apparition de la perturbation _____	142
5.2.4.2	Résolution d'un problème issu d'une perturbation organisationnelle _____	143
5.2.5	Synthèse _____	143
5.3	Conclusion _____	145
Conclusion _____		149
Bibliographie _____		153
Annexe _____		167

Table des illustrations

Figure 1 : Représentation des différents domaines des données projet.....	12
Figure 2 : Cycle d'élaboration du produit [Mony, 92].....	14
Figure 3. Le système de conception [Girard, 99].	16
Figure 4 : Relations entre objectifs, système, indicateurs de performance et leviers d'action.	18
Figure 5 : Le modelleur géométrique au cœur de la conception collaborative : adapté de [Dufaure et Teissandier, 08].....	25
Figure 6 : Graphe technologique ou « T_graphe » d'après Dupinet [Dupinet, 91].	28
Figure 7 : Modèle fonctionnel du disque frein [Tollenaere et Constant, 97].	28
Figure 8 : Etat du modèle produit d'un « Actionneur multi-énergie » [Eynard, 99].	29
Figure 9 : Exemple de graphe « Etat-transition » d'après Dupinet [Dupinet, 91].	30
Figure 10 : Le modèle produit au cœur des expertises de conception : adapté de [Dufaure et Teissandier, 08]...	32
Figure 11 : Les trois vues du modèle produit d'après Sellini [Sellini, 99] et Yvars [Yvars, 01].	34
Figure 12 : Modèle produit pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances [Harani, 97]	35
Figure 13 : Arbre tâches/méthodes d'après Vargas [Vargas, 95].....	36
Figure 14 : Modèle processus multiniveau [Harani, 97].	37
Figure 15 : Diagramme de classes UML du modèle FBS-PPRE [Labrousse, 04].	40
Figure 16 : Gestion de la notion de comportement dans le modèle FBS-PPRE [Labrousse, 04].....	41
Figure 17 : Interface du démonstrateur de système d'information FBS-PPRE : extrait de [Labrousse, 04].	42
Figure 18 : Le modèle PPO au centre de toutes les expertises liées au projet.....	43
Figure 19 : Modèle de référence d'un système de conception : adapté de [Robin, 05].....	44
Figure 20 : Modèle processus d'IPPOP [Bettaieb, 06].....	45
Figure 21 : Interface du portail IPPOP : extrait de [Merlo, 09].....	46
Figure 22 : Description locale du système de conception [Robin, 05].....	53
Figure 23 : Le modèle conceptuel de référence GRAI [Girard, 99].....	54
Figure 24 : Vision multiprojet de l'entreprise d'après la méthode GRAI [Gonçalves et al., 09].	54
Figure 25 : La structure GRAI R&D [Girard et Doumeingts, 04].	56
Figure 26 : La grille GRAI [Girard, 99].	59
Figure 27 : Activité de décision [Eynard, 99].	61
Figure 28 : Activité d'exécution.	62
Figure 29 : Activité de conception.	64
Figure 30 : Le déclencheur [Eynard, 99].....	64
Figure 31 : Opérateur de série [Eynard, 99].	65
Figure 32 : Opérateurs divergence et convergence en ET [Eynard, 99].....	65
Figure 33 : Opérateurs divergence et convergence en OU [Eynard, 99].	66
Figure 34 : Opérateurs d'itération [Eynard, 99].	66
Figure 35 : Activité complexe : agrégation d'activités élémentaires.	67
Figure 36 : Représentation UML (Unified Modeling Language) du modèle produit, d'après [Dufaure, 05].	69
Figure 37 : Mécanisme de décomposition.....	71
Figure 38 : Diagramme pieuvre du mécanisme à concevoir.	72
Figure 39 : Description du mécanisme à concevoir [Dufaure, 05].....	73
Figure 40 : Décomposition de la fonction de service FS1 et du mécanisme dans le modèle produit.....	73
Figure 41 : Exemple de décomposition structuro-fonctionnelle du modèle produit.	74
Figure 42 : Schéma cinématique minimal d'une turbine haute pression.....	75
Figure 43 : Relations entre les spécifications géométriques globales et locales.	81
Figure 44 : Relations entre les spécifications projet globales et locales.....	82
Figure 45 : Traçabilité de l'évolution du produit durant le cycle de conception [Dufaure et Teissandier, 08].	84
Figure 46 : Spécification géométrique (planéité) sur une surface nominale plane.....	85
Figure 47 : Transfert de spécifications dans le cycle de vie partiel : adapté de [Mouton, 10]	86
Figure 48 : Transfert de spécifications interniveaux et intervues : adapté de [Ballu et al., 07].....	89
Figure 49 : Transfert interniveaux pour l'expertise tolérancement géométrique [Dufaure et Teissandier, 08].....	90
Figure 50 : Transfert intervues de spécifications géométriques entre une vue conception et une vue métrologie d'après [Ballu et al., 07].	91
Figure 51 : Lien entre objet père et fils et relations entre objets fils.	92

Figure 52 : Transfert de spécifications interniveaux	93
Figure 53 : Représentation d'un objet dans une vue globale et relations de corrélation vers les autres vues.	95
Figure 54 : Représentation multivue d'un objet.....	95
Figure 55 : Illustration des différences entre les vues au niveau de détail n+1.....	95
Figure 56 : Transfert de spécifications interniveaux	96
Figure 57 : Formalisme du transfert interniveaux appliqué aux grilles GRAI R&D.	98
Figure 58 : Formalisme du transfert intervues appliqué aux grilles GRAI R&D.....	99
Figure 59 : Correspondance entre les entités du transfert interniveaux/intervues et une grille GRAI R&D.....	99
Figure 60 : Formalisme du transfert interniveaux appliqué aux réseaux GRAI.....	100
Figure 61 : Correspondance entre les entités du transfert interniveaux et les réseaux GRAI.	101
Figure 62 : Formalisme du transfert intervues appliqué au passage du système décisionnel vers le système technologique.....	102
Figure 63 : Formalisme du transfert interniveaux appliqué au modèle produit PPO.	103
Figure 64 : Correspondance entre les entités du transfert interniveaux et le modèle produit IPPOP pour les composants.....	104
Figure 65 : Formalisme du transfert intervues appliqué au modèle produit.....	104
Figure 66 : Correspondance entre les entités du transfert intervues et le modèle produit.	105
Figure 67 : Formalisme du transfert interniveaux appliqué aux réseaux GRAI.R&D.	106
Figure 68 : Correspondance entre les entités du transfert interniveaux et les réseaux GRAI R&D.....	106
Figure 69 : Description schématique du déroulement du scénario de conception (décomposition des phases de conception inspirée de [Pahl et Beitz, 96]).....	111
Figure 70 : Mise en place de perturbations dans le système technologique.....	112
Figure 71 : Etat initial du modèle produit lié à la turbine haute pression.....	114
Figure 72 : Etat 1 du modèle produit.....	115
Figure 73 : Passage de l'état 1 à l'état 2 du modèle produit dans le niveau de détail 0.	116
Figure 74 : Description du passage du niveau de détail 0 à 1 des fonctions du produit.	117
Figure 75 : Etat 2 simplifié du modèle produit : point de vue tolérancement géométrique et point de vue thermomécanique.	117
Figure 76 : Transfert de spécifications intervues vers les vues tolérancement géométrique et thermomécanique.	118
Figure 77 : Définition du jeu rotor/stator et de la section de fuite d'une turbine haute pression [Pierre et al., 10].	118
Figure 78 : Transfert de spécifications interniveaux dans la vue tolérancement géométrique.....	119
Figure 79 : Transfert de spécifications interniveaux dans la vue thermomécanique.....	119
Figure 80 : IDEFØ de l'activité de l'expertise tolérancement géométrique adapté de [Dufaure, 05].	120
Figure 81 : IDEFØ de l'activité de l'expertise thermomécanique.....	120
Figure 82 : Etat 4 au niveau de détail 1 du modèle produit.....	121
Figure 83 : Processus de pré-industrialisation dans le bureau des méthodes.	121
Figure 84 : Forme compacte du processus de conception dans le bureau d'études.....	123
Figure 85 : Forme développée du processus de conception dans le bureau d'études.....	124
Figure 86 : Transfert interniveaux de spécifications projet dans le processus de conception du bureau d'études.	124
Figure 87 : Activité de conception dans le processus de conception de la turbine HP.	125
Figure 88 : Première activité d'exécution dans le processus de conception de la turbine HP.....	125
Figure 89 : Deuxième activité d'exécution dans le processus de conception de la turbine HP.....	126
Figure 90 : Activité de décision dans le processus de conception de la turbine haute pression.	127
Figure 91 : Affectation des supports d'activité du processus de conception vers les activités élémentaires.	127
Figure 92 : Processus de décision du centre de décision « Déterminer les architectures de solutions ».	128
Figure 93 : Transfert interniveaux de spécifications projet dans le processus de décision	129
Figure 94 : Détail du processus de décision « généralisé » adapté de [Eynard, 99].....	129
Figure 95 : Grille GRAI R&D associée au scénario de conception.	132
Figure 96 : Transfert de spécifications intervues entre le système décisionnel et le système technologique.....	133
Figure 97 : Transfert de spécifications intervues entre centres de décisions.....	134
Figure 98 : Transfert interniveaux de spécifications projet entre centres de décisions.	135
Figure 99 : Environnement PPO appliqué au scénario de conception.	136
Figure 100 : Pilotage du centre de conception (bureau d'études) par le centre de décision.....	137
Figure 101 : Apparition d'une perturbation de type technique lors du processus de conception.....	138
Figure 102 : Nouveau cadre de conception proposé par le centre de décision.....	139
Figure 103 : Apparition d'une perturbation de type technique lors du processus d'industrialisation.	140
Figure 104 : Nouveau cadre de conception proposé par le centre de décision (bureau des méthodes).....	141

Figure 105 : Apparition d'une perturbation dans le processus de conception..... 141
Figure 106 : Apparition d'une perturbation organisationnelle lors du processus de conception..... 142
Figure 107 : Traçabilité des spécifications impactées par SP3. 144
Figure 108 : Traçabilité des spécifications impactées par l'absence de ressources d'une activité. 144

Tableau 1 : Comparaison entre le modèle FBS-PPRE et les modèles usuels de la littérature (jusqu'en 2004) [Labrousse, 04]. 48
Tableau 2 : Caractérisation d'une activité de décision. 62
Tableau 3 : Caractérisation d'une activité d'exécution. 63
Tableau 4 : Proposition de caractérisation et de notation par indicateurs globaux (IG) pour aider au choix de solutions techniques [Gonçalves et al., 07]. 79
Tableau 5 : Typologie d'indicateurs des projets de conception de produits innovants [Christofol et al., 06]. 80
Tableau 6 : Caractéristique impactée en fonction des perturbations proposées. 113

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés en collaboration entre le Laboratoire Mécanique Physique (LMP) au sein de l'équipe « Cotation Usinage Biomécanique » et le laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) au sein du Département LAPS (Automatique, Productique et Signal).

Mes premiers remerciements reviennent tout d'abord à Philippe Girard qui m'a fait confiance en me proposant cette thématique de recherche intéressante et enrichissante.

Je remercie chaleureusement Denis Teissandier pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils tout au long de ces années. Son aide a grandement contribué à l'avancée de ces travaux. J'ai particulièrement apprécié sa rigueur scientifique me permettant de ne pas me disperser dans mes réflexions.

Je remercie Marc Deschamps, Directeur du LMP, et Pascal Fouillat, Directeur de l'IMS, de m'avoir accueilli au sein de leur laboratoire respectif, ainsi que les autres membres du personnel pour leur sympathie.

Je remercie mes collègues de bureau, Gaëtan Albert, Laurent Pierre, Serge Mouton et tous les autres pour m'avoir supporté pendant mes périodes de doutes et pour m'avoir permis de toujours avancer.

Enfin, j'aurais une pensée pour Alice, mon épouse, pour sa présence et son aide au quotidien, mais également pour sa patience de tous les instants.

Je dédie ces travaux à mon père qui, bien qu'étant à mille lieux de comprendre ce que je fais, m'a toujours poussé à poursuivre mes études.

Chapitre 1 Introduction

1.1 Objectifs et enjeux

Le cycle de conception des produits manufacturés a entamé une profonde mutation dans les années 80 avec l'apparition des premiers outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Partie intégrante du cycle de vie du produit, le cycle de conception est la phase allant de l'expression du besoin du produit à son industrialisation. Le cycle de vie comporte d'autres phases dont la fabrication, l'utilisation, le recyclage, etc. Les premiers outils de CAO ont initié la numérisation des données géométriques manipulées dans les bureaux d'études en remplaçant les planches à dessin. Rapidement sont apparus les premiers modelers géométriques 3D, autour desquels se sont greffées de nombreuses applications métiers. L'accroissement des performances des ordinateurs a grandement contribué à générer de très nombreuses applications d'aide à la conception dans la plupart des métiers impliqués dans le développement d'un produit. Désormais le cycle de conception de produits manufacturés repose sur une maquette numérique mise en œuvre au travers d'une chaîne numérique de simulations [Danesi *et al.*, 08].

La quantité d'informations manipulées par ces différents outils a augmenté de manière considérable et il a fallu commencer à imaginer des plateformes pouvant gérer toutes les données numériques liées au produit. Ces données manipulées peuvent être appelées données produit ou données techniques : elles font directement référence au produit (définitions géométriques, calculs de structures, simulations de fabrication, ...). Le besoin de ce type de plateformes s'est d'autant plus accru que commença à apparaître le concept d'ingénierie concourante (ou ingénierie simultanée) [Sohlenius 92] [Jo *et al.*, 93] dans un contexte d'entreprise étendue. La gestion des données de conception est devenue un enjeu majeur pour les éditeurs de solutions de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) et a entraîné de nombreux investissements et travaux sur la problématique du *Product Lifecycle Management (PLM)* notamment au travers de Système de Gestion de Données Techniques (SGDT) [Martin, 09]. Implémentés sur une base de données, ces outils permettent d'assurer la définition du produit tout au long de la phase de conception et de partager les données entre les divers métiers.

De manière similaire, la planification des activités d'une entreprise et la gestion des ressources reposent désormais sur des outils informatiques experts se substituant aux

traditionnels tableaux de planification. Les origines des méthodes et des outils traitant de cette problématique sont essentiellement issues des travaux réalisés dans le domaine de la productique, avec la planification de la production industrielle et la gestion des ressources machines et humaines. Les systèmes *Enterprise Resource Planning (ERP)*, dérivés des *Manufacturing Resource Planning (MRP)*, ont permis d'intégrer les informations issues de différentes origines de l'entreprise dans une base de données unique [Esteves et Pastor, 01]. Ces données font partie des données manipulées pendant le cycle de conception mais ne font pas directement référence au produit (utilisation des ressources, taux d'externalisation, partenariat, ...). Elles sont fortement dépendantes de la stratégie industrielle et sont tout aussi influentes sur le cycle de conception que les données techniques.

Un projet de conception vise à créer, sur une durée déterminée, la définition d'un produit. Les données projet ou PPO sont définies par l'ensemble des données utilisées pendant la durée d'un projet. Les données projet sont l'union des données produit, processus et organisation (voir figure 1). Une plateforme de données produit permet de gérer les relations de dépendance entre les données produit tout au long du cycle de conception à travers tous les métiers techniques (modélisation géométrique, tolérancement, calculs de structures, usinage, fonderie, etc.). La traçabilité des données techniques y est assurée. D'autres plateformes s'assurent de la traçabilité de données autres que produit. Ainsi, alors que les outils de SGDT permettent, dans un environnement multiprojet, d'optimiser la performance des produits les systèmes *ERP* se focalisent sur l'optimisation de l'utilisation des ressources. Pour autant, ces outils ne sont que peu mis en relation alors qu'ils agissent conjointement sur le cycle de conception tout en revendiquant des compétences sur le *PLM*. Les coûts et les délais sont des indicateurs que l'on cherche à optimiser en permanence et qui dépendent de données projet. En effet, cette optimisation ne peut être efficace que si elle est étudiée avec une vision globale du projet, c'est-à-dire en prenant en compte l'ensemble des données projet. Jusqu'à présent, la performance en conception était basée sur les seuls résultats de l'activité de conception, à savoir le produit, à l'aide des modèles produit et parfois des modèles de processus de conception [Robin et Girard, 05]. L'évaluation et l'amélioration de la performance en conception doivent passer par la prise en compte des interactions entre le produit, le processus et l'organisation [Love, 02]. C'est la principale vocation des plateformes PPO.

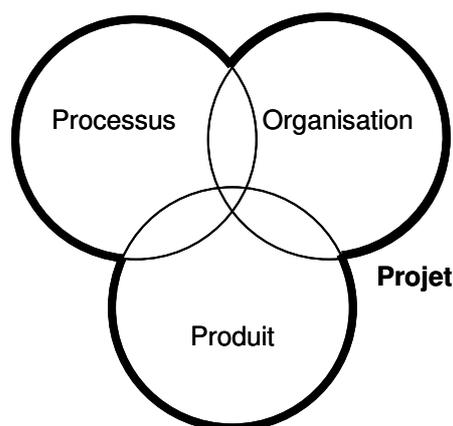


Figure 1 : Représentation des différents domaines des données projet

Des études ont montré que les décisions prises pendant le cycle de conception ont un impact important sur le coût final d'un projet (50 % à 75 %) alors qu'au moment où ces décisions sont prises, les coûts du projet sont encore faibles (environ 5 % du coût total) [Suh, 88] [Boothroyd, 88] [Berliner et Brimson, 88] [Ullman, 03]. Le cycle de conception est

donc un vecteur essentiel de la performance industrielle sous réserve de connaître les liens de traçabilité de l'ensemble des données d'un projet.

La traçabilité est l'aptitude à retrouver l'historique, l'utilisation ou la localisation d'une entité au moyen d'identifications enregistrées [ISO 8402, 94]. L'entité peut désigner un produit, un processus, un organisme ou une personne. L'intérêt de la traçabilité repose sur la capacité d'effectuer une analyse ascendante ou descendante des liens. La traçabilité ascendante permet de retrouver l'origine d'une donnée c'est-à-dire de remonter à la source d'un problème qui apparaîtrait sur une entité. La traçabilité descendante permet de déterminer quelles entités seront impactées par une donnée particulière.

Pour atteindre ses objectifs, l'état du projet est mesuré par l'intermédiaire d'indicateurs de performance associés à des leviers d'action. L'effet d'un levier d'action sur le projet ne peut être réellement connu qu'au travers des liens de traçabilité entre les données du projet. La traçabilité des données est donc un enjeu majeur du pilotage d'un projet de conception. La connaissance de ces liens doit permettre d'aider les acteurs du cycle de conception à :

- évaluer l'influence d'une décision ou d'un choix sur le projet en cours,
- mettre en place les bons leviers d'action associés à ces indicateurs,
- évaluer les risques à utiliser ou non les leviers d'action.

Dans le cadre d'une ingénierie concourante, le travail présenté dans ce mémoire repose sur la formalisation de la traçabilité des données manipulées par une plateforme dédiée à la conception collaborative. La traçabilité des données est définie par une succession de transferts de spécifications. Un transfert est un mécanisme permettant de formaliser les liens de causalité entre les données manipulées par le processus de conception et plus particulièrement entre les spécifications projet. Ces mécanismes de transferts doivent :

- prendre en compte l'ensemble des spécifications projet,
- pouvoir être utilisés tout au long du cycle de conception,
- être force de proposition dans la mise en place d'indicateurs de performance.

1.2 Contexte de l'étude

La conception n'est pas une activité figée dans le temps. Cette évolution temporelle aussi appelée « cycle de conception » a été théorisée pour la première fois en 1977 par Gerhard Pahl et Wolfgang Beitz dans leur ouvrage *Konstruktionslehre* (réédité en 1996 [Pahl et Beitz, 96]). Cet ouvrage décrit les phases successives de conception de produits manufacturés par les termes suivants :

- phase de définition fonctionnelle : permettant de préciser les fonctionnalités que doit remplir l'objet ainsi que la modélisation fonctionnelle du besoin,
- phase de définition conceptuelle : permettant de préciser quels principes physiques vont être utilisés pour remplir les exigences fonctionnelles,
- phase de définition physico-morphologique : permettant de préciser quels éléments physiques et organiques sont requis pour réaliser les principes physiques retenus,
- phase de définition détaillée : permettant de décrire au niveau le plus bas les interactions entre les pièces et leur mode de production.

Le cycle de conception est souvent modélisé comme un processus linéaire, que cela soit dans l'industrie ou les normes ([Fanchon, 94], [AFAV, 94], [Cavaillès, 95], [BNAE, 99]), ou dans les publications scientifiques ([Hubka *et al.*, 88], [Aoussat, 90], [Quarante, 94],

[Dieter, 00], [Hubka et Eder, 01], [Ullman, 03]). Dans l'ensemble de ces études, la conception porte sur l'évolution du produit. Le produit est un élément important puisqu'il constitue le dénominateur commun à tous les acteurs, du client au fabriquant en passant par le concepteur, mais cet élément est insuffisant quand on veut s'intéresser plus précisément aux activités du processus de conception. La prise en compte du processus de conception et de l'organisation de l'entreprise est indispensable quand on vise la performance globale d'un projet. Si ces aspects ont tardivement été pris en compte c'est qu'il est très difficile de comprendre les activités purement humaines et que les moyens d'influencer leurs résultats sont mal connus [Rosenman et Gero, 98]. Ce mode d'organisation s'écarte de plus en plus de la réalité avec d'une part, l'intégration du cycle de conception dans le cycle de vie du produit (figure 2) et, d'autre part, l'ingénierie concourante. Ces deux aspects sont à l'origine du concept de Design For X où le « X » correspond à l'étape du cycle de vie du produit pris en compte dans la conception. Ce type d'ingénierie est d'autant plus nécessaire en conception innovante voire créative. En effet, la conception innovante fait appel à une part d'innovation pour résoudre un problème. Le processus de conception ne peut être totalement défini à l'avance car, même si une grande partie du problème utilise des solutions connues, on y introduit de nouveaux éléments, de nouvelles utilisations de technologie, de nouveaux procédés de fabrication, etc. Elle demande de 20 à 50 % de connaissances nouvelles [Culversouse, 95]. En conception créative, d'après George E. Dieter [Dieter, 00], ni les attributs ni les méthodes ne sont connus. L'élément clé dans ce type de conception est la transformation du subconscient en conscient [Sriram *et al.*, 89]. Il est nécessaire d'étendre les connaissances de conception (et de production) d'une entreprise, au-delà de 50 % de connaissances nouvelles, c'est ce qu'appelle Culversouse [Culversouse, 95] une « conception stratégique ». Pour cela il faut mettre en œuvre d'une part de nouveaux principes de solutions et, d'autre part, des processus de conception indéterminés.

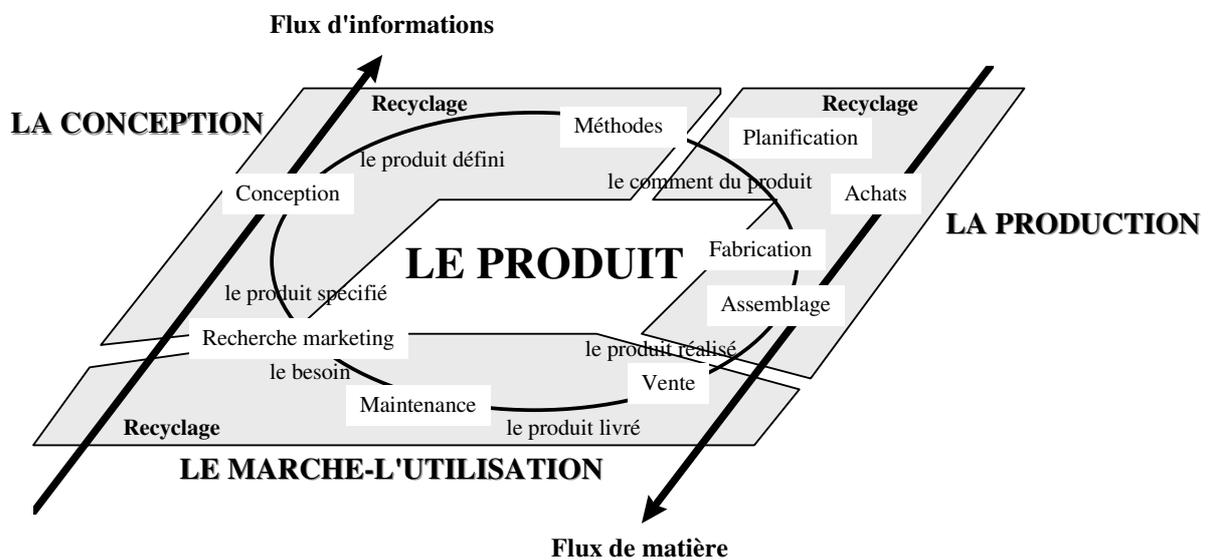


Figure 2 : Cycle d'élaboration du produit [Mony, 92]

Par rapport à cette formalisation historique, un des grands apports complémentaires à cette vision de la conception a été proposé par Suh [Suh, 90] avec la théorie de l'Axiomatic Design. Celle-ci a pour but de qualifier la qualité d'une conception, sans pour autant remettre en question la forme décrite précédemment. Il introduit pour ce faire une matrice croisant les besoins fonctionnels (Functional Requirements) et les paramètres de conception (Design Parameters). Idéalement, une conception répond aux deux axiomes suivants :

- l'axiome d'indépendance : les fonctions doivent être indépendantes. Une des conséquences de cet axiome est d'éviter de dégrader une fonction en cherchant à en améliorer une autre,
- l'axiome d'information postule qu'entre deux solutions, celle reflétant la meilleure conception est celle ayant l'information la plus faible. En d'autres termes c'est la conception la moins complexe.

Au-delà de ce formalisme, son principal apport a été de mettre en lumière, de façon indépendante, les deux catégories de paramètres, fonctionnels et techniques, pour les croiser et évaluer ainsi la robustesse d'une méthode de conception. Ces deux catégories ont été réutilisées dans de nombreux modèles Produit pour définir les visions fonctionnelle et structurelle du produit.

Les travaux présentés dans ce mémoire devront s'appliquer à tous types de conception et ceux tout au long du cycle de conception.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés conjointement entre l'équipe Ingénierie de la conception (ICO) du Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) et le département Cotation Usinage Biomécanique (CUB) du Laboratoire de Mécanique Physique (LMP). Cette collaboration apporte une vision plus étendue de la conception s'appuyant sur les travaux liés à la traçabilité des spécifications géométriques développés par le LMP, et les travaux liés à la conduite du système de conception engagés par l'IMS. En contrepartie, le sens donné à certains termes dans ces deux champs de compétences n'est pas toujours identique. Ce paragraphe permet de lever des ambiguïtés de vocabulaire et d'expression.

1.3 Terminologie

Ce mémoire fait référence à des plateformes prenant en compte les aspects Produit, Processus de conception et Organisation. Un **environnement PPO** est un environnement permettant de partager l'ensemble des données projet manipulées au cours du cycle de conception. L'utilisation d'une plateforme de ce type doit permettre de simuler la performance d'un projet.

La **performance** est définie par un ensemble de spécifications. Une spécification est une condition sur une ou plusieurs caractéristiques. Une caractéristique pourra être une dimension, une masse, une puissance mais aussi un coût, un délai, une ressource matérielle ou humaine.

La performance d'un projet sous-entend la performance technique mais également la performance du processus de conception et de l'organisation de l'entreprise. La performance est mesurée par des **indicateurs de performance**. La performance technique est définie par un ensemble de spécifications techniques également appelées **spécifications produit** (masse, puissance, vitesse maximale, encombrement, ...). Un indicateur de performance technique évalue l'adéquation entre les fonctionnalités du produit et les besoins attendus dans le cahier des charges. De même, la performance du processus et de l'organisation est définie par un ensemble de spécifications (délai de développement, coût de développement, taux de ressources utilisées, ...). Un indicateur de performance lié à ces spécifications évalue l'adéquation entre le déroulement du projet et la planification prévue. Une description de l'ensemble de ces indicateurs existe [Christofol *et al.*, 06]. Le plus souvent ces spécifications

sont dépendantes de spécifications produit et inversement. Les spécifications de coûts et de délais sont de très bons exemples de spécifications appartenant à la fois aux domaines du produit, des processus (de décision, de conception, de production) et de l'organisation.

Les indicateurs de performance sont utilisés comme un outil de pilotage permettant d'atteindre les objectifs globaux de l'entreprise. Le **système décisionnel** de l'entreprise (système pilotant) communique avec le **système technologique** qui fait évoluer les produits (système piloté). Le système décisionnel reçoit des informations du système technologique sur l'état du produit, les convertit en indicateurs de performance et agit sur le système technologique au travers de leviers d'action liés à des indicateurs de progrès (voir figure 3).

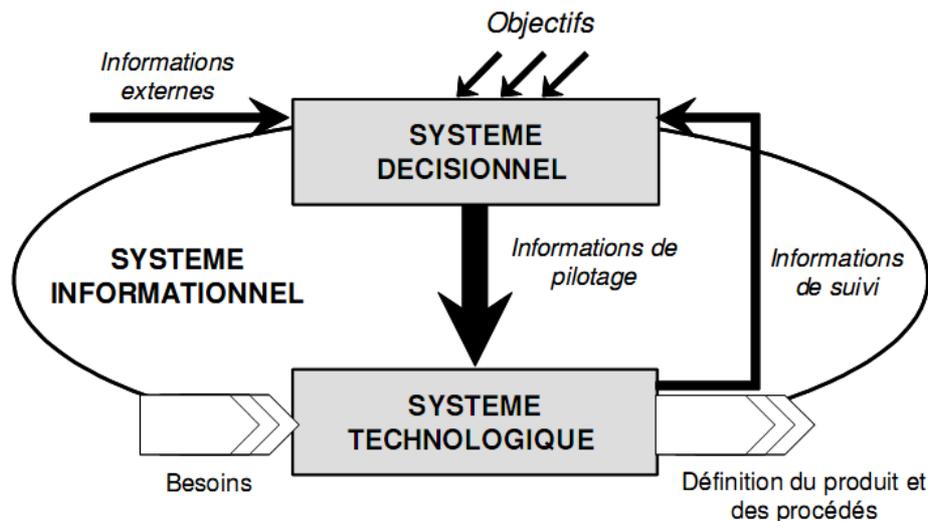


Figure 3. Le système de conception [Girard, 99].

Le terme **processus** sera fréquemment utilisé dans ce mémoire. Le travail présenté faisant référence à la conception de produits manufacturés, ce terme, s'il n'est pas précisé, renverra au processus de conception. Le processus de conception couvre l'ensemble des activités allant de l'expression du besoin jusqu'à la définition du produit [Scaravetti, 04]. Le processus de conception exclu la phase de fabrication du produit (production).

Un processus peut utiliser une ressource ou un type de ressource. Une ressource permet d'effectuer une tâche (une personne, une machine, un programme, etc.) alors qu'un type de ressource représente la fonction de la ressource (une expertise métier, un type de machine, un type de logiciel). Un logiciel CAO est un type de ressource alors que Pro/ENGINEER, CATIA, SOLIDWORKS sont des ressources. Pour autant les ressources ne peuvent être considérées comme interchangeables. Si des ressources peuvent effectuer une même tâche elles ont aussi leurs contraintes propres qui influent sur le résultat de leur utilisation.

Une **organisation** est un ensemble d'éléments en interaction, regroupés au sein d'une structure régulée, ayant un système de communication pour faciliter la circulation de l'information, dans le but de répondre à des besoins et d'atteindre des objectifs déterminés [Wikipédia, 10]. Une organisation ne peut être restreinte au travail effectué au sein d'un groupe de personnes comme dans un bureau d'étude par exemple. Ce type d'organisation humaine sera qualifié d'organisation de la conception. Sans précision, l'organisation mentionnée dans ce mémoire sera celle de l'entreprise c'est-à-dire sa structuration en services ou départements.

1.4 Problématique

Le nombre d'outils d'aide à la conception de produit manufacturés a augmenté mais leur efficacité reste souvent limitée à une expertise particulière. Concomitamment, les outils de planification et de gestion de ressources en conception ne sont pas toujours en relation avec l'objet manipulé par les métiers impliqués dans le cycle de conception. Les plateformes PPO sont censées répondre à ce besoin de réunification des données.

Le manque d'interconnexion entre des modélisations produit, processus et organisation est très souvent responsable d'un cloisonnement entre les spécifications d'un projet. Ce manque d'interconnexion est un obstacle à la traçabilité de spécifications PPO. L'impact d'une décision sur des spécifications techniques est actuellement difficile à apprécier, d'autant plus si la décision s'appuie sur des spécifications qui ne sont pas liées au produit. Ce manque de relation contribue à générer des processus de conception qui reposent sur des itérations de recherche de solutions ce qui entraîne des surcoûts et des délais importants.

L'objectif des travaux présentés dans ce mémoire est de proposer des **mécanismes de transferts de spécifications projet** aussi qualifiées de PPO dans un environnement PPO assurant leur traçabilité. Ce travail vise à améliorer la mise en place d'indicateurs de performance en conception collaborative et à faciliter l'accès aux données pertinentes dans une démarche d'aide à la décision. Un indicateur de performance n'est efficace que s'il est associé à un levier d'action. En conception, les répercussions d'une décision et donc de l'utilisation d'un levier d'action sont mal connues. Il faut, par conséquent, connaître les liens de traçabilité des spécifications rencontrées en conception. Sans cette connaissance, les décisions prises produisent des processus dits d'« essais-erreurs ». Les justifications des décisions ne reposant pas toujours sur les bonnes données. La traçabilité des spécifications techniques ainsi que celles issues du processus de conception (manière de concevoir) et de l'organisation de l'entreprise (manière de planifier), doivent permettre de relier les spécifications entre elles.

La traçabilité des spécifications géométriques a fait l'objet d'études au sein du LMP [Dufaure et Teissandier, 08]. Cette traçabilité permet d'assurer le transfert des spécifications géométriques à travers les différents niveaux de détail du produit mais également vers les différentes activités de la conception aussi appelées « vues ». Le premier transfert est lié à la décomposition du produit : il peut être qualifié de **transfert interniveaux**. Le second est une corrélation des spécifications entre plusieurs vues métiers : il s'agit d'un **transfert intervues** [Ballu *et al.*, 07]. L'intérêt de ces travaux est de suivre la propagation d'une exigence globale, exprimée sur le produit, jusqu'à la définition très détaillée d'une pièce en spécifications géométriques ISO [Luneau *et al.*, 03]. De plus, les corrélations d'une exigence entre les différentes vues conception, fabrication et métrologie sont mises en évidence en illustrant des relations de réciprocité des spécifications.

Ce mémoire propose une généralisation des concepts de transfert interniveaux et de transfert intervues, initialement dédiés aux spécifications géométriques, aux spécifications projet. Pour ce faire, les transferts de spécifications géométriques seront d'abord généralisés aux spécifications techniques pour enfin être étendus aux spécifications projet.

Pendant le développement du produit, les experts métiers ne se limitent pas à partager des spécifications géométriques. Le transfert de spécifications peut être généralisé à un grand nombre de spécifications manipulées au travers des métiers de la conception. Dans un modèle

produit, le transfert interniveaux dépend du niveau de décomposition du produit, que cette décomposition soit structurelle, fonctionnelle et avec des variantes comportementales (situations de vie). Le transfert intervues peut s'appliquer à l'ensemble des spécifications techniques par des relations de corrélations de spécifications entre les diverses expertises métiers participant au cycle de conception. Ces relations de corrélations ne sont pas toujours formalisables mathématiquement et peuvent reposer sur le savoir faire et l'expérience des acteurs d'une entreprise.

Le transfert de spécifications techniques est transposé aux spécifications projet, en procédant par analogies. Il est possible d'établir des similitudes entre la décomposition d'un produit et la décomposition d'un processus. Un processus père peut se décomposer en plusieurs processus fils. Les ressources, les objectifs et les contraintes d'un processus père doivent être transférés vers les processus fils. De manière analogue, les différents niveaux de description d'un produit d'un point de vue technique peuvent être considérés comme les différents niveaux décisionnels d'un point de vue entreprise. Chaque service d'une entreprise intervient sur plusieurs niveaux hiérarchiques décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Le déploiement d'informations d'un niveau hiérarchique vers un autre consiste également à transférer des spécifications. Ainsi, le transfert interniveaux peut s'appliquer aux spécifications projet. Par ailleurs, l'organisation d'une entreprise étant composée de plusieurs départements ou services qui communiquent entre eux, il est également possible de comparer ses services aux différentes vues métiers d'un modèle produit : le transfert intervues est utilisé dans une organisation. De même, la spécialisation de spécifications projet provenant du système décisionnel (système pilotant) en spécifications techniques adressées au système technologique (système piloté) est un transfert intervues. Ainsi, le transfert de spécifications intervues est généralisé aux spécifications projet.

L'utilisation des transferts interniveaux et intervues doit permettre la mise en place d'indicateurs de performance mieux à même de répondre aux problèmes liés à la prise de décisions. En s'appuyant sur une traçabilité des spécifications projet, les indicateurs de performance doivent permettre d'apprécier les risques et de remédier efficacement aux problèmes. Les leviers d'action associés à des indicateurs de performances devront permettre de savoir quoi modifier ou négocier pour résoudre les difficultés liées à des problèmes techniques et/ou liés à l'entreprise : voir figure 4.

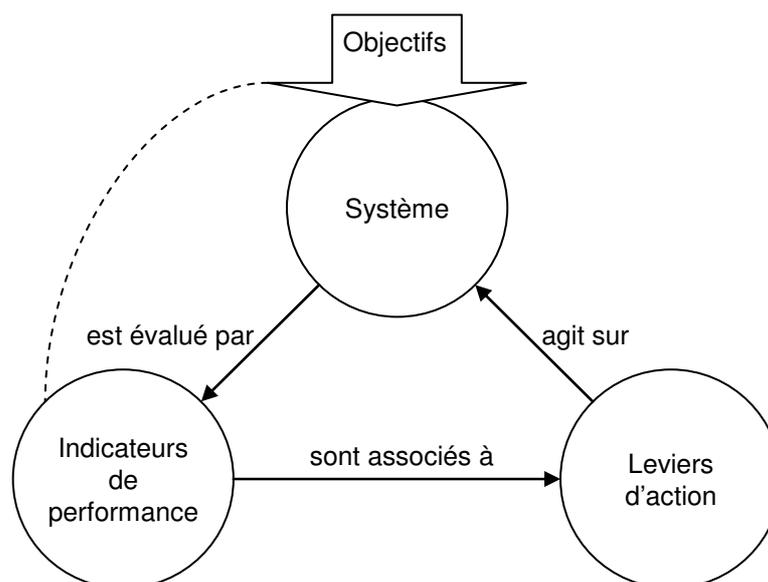


Figure 4 : Relations entre objectifs, système, indicateurs de performance et leviers d'action.

1.5 Plan de lecture

Le **chapitre 2** présente un historique de la genèse des **environnements PPO** à travers l'évolution des modèles ayant vocation à aider à la conception collaborative. Pour beaucoup d'entreprises, les données géométriques continuent à être le principal vecteur permettant la collaboration entre les acteurs liés à la conception. En parallèle, l'évolution industrielle contribua à mettre en place des SGDT pour rassembler les données tout en les rendant accessibles sous certaines conditions aux différents experts métiers. Les limitations des modèles de données purement géométriques ont contribué à l'émergence de modèles produit censés rassembler l'ensemble des données liées au produit. Cette modélisation n'étant pas suffisante pour prendre en compte certains aspects de la conception, des modèles produit ont été associés à des modèles processus. L'utilisation de ces deux types de modèle étant encore insuffisante pour décrire réellement toutes les relations ayant lieu pendant le cycle de conception, c'est ainsi que les premiers environnements PPO commencèrent à être proposés.

Un **environnement PPO** sera retenu dans le **chapitre 3**, afin de servir de plateforme d'application aux mécanismes de transferts développés dans ce travail. Cet environnement est fortement inspiré de celui obtenu à l'issue du projet IPPOP. En effet, les travaux présentés s'inscrivent dans la continuité du projet IPPOP dont l'environnement de modélisation est constitué de trois modèles principaux. Le modèle Produit provient des travaux réalisés en 2001-2005 au LMP (Université de Bordeaux), L3S (Université de Grenoble) et LASMIS (Université de Technologies de Troyes). Les modèles Processus et Organisation sont issus des travaux réalisés à l'IMS et reposent d'une part sur les réseaux GRAI et GRAI R&D et d'autre part sur la structure GRAI R&D. Ces modèles seront détaillés et complétés afin de leur assurer la cohérence nécessaire à la mise en place des mécanismes de transferts de spécifications.

L'apport principal des travaux proposés est présenté dans les deux prochains chapitres. Ils constituent une force de proposition dans la mise en place d'indicateurs de performance en conception.

Le **chapitre 4** sera consacré à la **formalisation des transferts de spécifications projet**. L'objectif du travail présenté dans ce chapitre est de proposer une généralisation des mécanismes de transferts de spécifications géométriques aux spécifications projet au travers des modèles produit, processus et organisation. Les propositions faites devront être mises en place dans l'environnement PPO d'application retenu.

Pour conclure ce mémoire, le **chapitre 5** illustrera les propositions faites dans un contexte industriel au travers d'un **scénario de conception** d'une turbine haute pression. Le scénario s'appuiera sur les modèles présentés dans le chapitre 3. Les transferts de spécifications proposés dans le chapitre 4 y seront identifiés et décrit par l'intermédiaire d'exemples. Des perturbations dans le déroulement de la conception du produit seront simulées. Ces perturbations interviendront dans un bureau d'études ou dans un bureau des méthodes et concerneront tout type de données projet.

Le contexte général de ce travail s'inscrit dans l'évaluation de la performance d'un projet de conception de produits manufacturés. La performance d'un projet, souvent caractérisée par un ensemble d'indicateurs, ne repose pas uniquement sur la performance du produit mais sur la performance du triptyque produit processus et organisation (PPO). Durant le cycle de conception de très nombreuses spécifications projet (également qualifiables de PPO) sont déployées dans un environnement de conception collaborative. Le déploiement de ces spécifications consiste d'une part à les transférer d'un niveau de détail donné vers un niveau de détail plus affiné (transfert interniveaux) et d'autre part depuis une vue globale vers des vues particulières (transfert intervues). Ces deux mécanismes de transferts ont déjà été introduits pour les spécifications géométriques des produits. Ce travail propose d'étendre ces deux mécanismes de transferts des spécifications géométriques à des spécifications projet.

L'objectif principal de ce travail est de montrer comment la traçabilité des spécifications projet permet d'asseoir la robustesse des leviers d'action indispensables à un indicateur de performance afin de pouvoir identifier sur quoi agir dans le projet en cours pour converger au mieux vers les objectifs initiaux.

Chapitre 2 Modélisation pour la conception collaborative

Dans le chapitre précédent, nous avons souligné que la problématique de ce travail repose sur l'intégration des aspects produit, processus, organisation dans un même environnement idoine pour garantir la traçabilité des spécifications projet. Historiquement, les premiers modèles partageant des données utilisées en conception sont des modèles produit, le plus souvent restreints à des données géométriques. En mettant le produit au cœur de la conception, la performance technique est *a priori* maîtrisée. Dans le contexte économique actuel fortement concurrentiel, la performance technique n'est pas suffisante au regard des exigences d'une entreprise en termes de coûts et de délais du projet. Depuis plus d'une décennie, des travaux sur des modèles de données, complémentaires aux aspects intrinsèques au produit, ont émergé.

Les autres aspects influençant la performance du projet, au delà de la description du produit, sont les processus de conception et de décision ainsi que l'organisation des projets de l'entreprise. La simulation de l'état d'un projet permet la maîtrise efficace et effective de son déroulement. Cette simulation peut reposer sur trois modèles de base que sont le modèle produit, le modèle processus et le modèle organisation. Ces modèles sont étroitement liés rendant la simulation de l'état du projet délicate car ils ne peuvent pas être mis en œuvre de manière indépendante.

Dans la littérature, un certain nombre de solutions permettant de modéliser à la fois le produit et d'autres aspects tels que le processus, l'organisation voire les ressources ont été proposées. Ce chapitre propose un état de l'art des modélisations utilisées en conception collaborative dans ce cadre particulier. Chronologiquement, le produit ayant été au centre de la conception, c'est le processus de conception qui a été ensuite modélisé pour garder l'historique de la conception. La modélisation de l'organisation a complété l'ensemble mais celle-ci s'est souvent limitée à la gestion des ressources : peu de travaux se sont intéressés à la modélisation de l'organisation des projets et plus généralement de l'entreprise dans sa globalité.

Les travaux sur la manipulation et la gestion des données de conception ont été réalisés pour de nombreux environnements et contextes particuliers de conception. Ces différents travaux reposent le plus souvent sur des concepts permettant de définir des modèles dits génériques, adaptables à différents métiers et différents niveaux de détail. De nouvelles

propositions continuent à apparaître au travers de développements en recherche et d'applications industrielles en cours.

La liste ci-dessous, complétant la liste proposée par Eynard [Eynard, 00], présente de façon non exhaustive des travaux de laboratoires français réalisés à partir des années 90 et traitant de représentation, de modélisation et formalisation d'informations dans un contexte de conception :

- Laboratoire PL - Ecole Centrale de Paris : Dupinet (91), Mony (92), Cantzler (96), Chambolle (99), Ouazzani (99),
- Laboratoire 3S - Grenoble : Belloy (94), Constant (96), Rémondini (96), Chapa Kasusky (97), Roucoules (99), Troussier (99),
- LAMIH - Valenciennes : Deneux (93), Jacquet (98), Ben Amara (98),
- LGIPM - Metz : Harani (97), Gardoni (99),
- CRAN - Nancy : Derras (98), Million (98),
- LAP/GRAI - Bordeaux : Girard (99), Eynard (99),
- LURPA - ENS de Cachan : Vargas (95), Saucier (97), Yvars (01),
- GRIIEM - St Ouen : Sellini (99),
- GILCO - Grenoble : Menand (02),
- IRCCyN/ IVGI - Nantes : Bernard (99), Labrousse (04).

Nous pouvons également présenter, de manière non exhaustive, les travaux de chercheurs étrangers s'intéressant à cette problématique :

- Etats-Unis : Fenves, Boothroyd (94), Sudarsan (05),
- Japon : Umeda (90),
- Australie : Gero (90),
- Canada : Gu (95),
- Suède : Kjelberg (92),
- Allemagne : Krause (92), Grabowski (95),
- Royaume-Uni : Swift (03).

L'ensemble de ces travaux s'intéresse aux informations permettant la représentation du produit, du processus d'ingénierie, des savoir-faire et connaissances métiers, etc. Les modèles reposent le plus souvent sur des approches multivues, multiniveaux et multi-acteurs afin de faciliter la démarche de conception.

Les outils et les méthodes actuels ne permettant que rarement une approche globale [Bordegoni *et al.*, 04], la vision de l'entreprise est souvent parcellaire. Elle se focalise de manière séquentielle à la conception des produits, au management des ressources, à la gestion des stocks, à la fabrication, etc. Les offres dites « globales » sont le plus souvent obtenues par l'agglomération d'outils disparates sans réelle intégration et modèles communs. Pourtant, toutes les informations étant bien souvent corrélées [Labrousse, 04], une approche plus cohérente et plus homogène peut s'avérer utile même si elle semble, à l'heure actuelle, peu réaliste.

Le caractère dynamique des informations, est rarement correctement pris en compte : l'aspect comportemental est soit absent des modèles, soit intégré de manière peu réaliste en considérant le comportement indépendamment des processus par exemple.

2.1 Les modèles de Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

Historiquement, les outils de CAO sont les premiers outils de modélisation du produit au travers de sa géométrie. De nos jours, de nombreux outils de CAO sont capables de supporter plusieurs phases du processus de conception et de représenter les différentes étapes du cycle de vie en phase de conception (conceptuelle, détaillée, fabrication, assemblage, ...).

Les outils CAO ont permis, en particulier grâce aux facilités de modification du modèle, d'élaborer des solutions dans des délais plus courts que dans le passé. Les traditionnelles tables à dessin disparaissent des bureaux d'études au profit d'ordinateurs. Les supports de communication privilégiés sont les fichiers contenant les données graphiques du produit.

La modélisation CAO permet une représentation 3D de la géométrie du produit à concevoir. Cette représentation graphique sert de base aux acteurs de la conception. La figure 5 illustre la position du modèleur géométrique vis-à-vis des applications métiers utilisés par les experts.

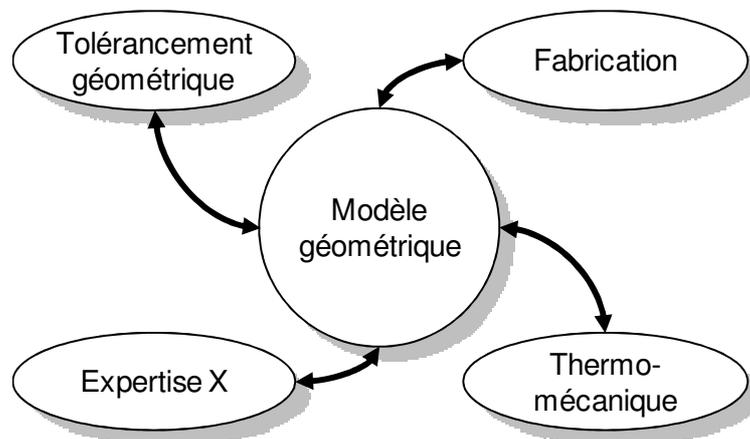


Figure 5 : Le modèleur géométrique au cœur de la conception collaborative : adapté de [Dufaure et Teissandier, 08]

Les éditeurs d'outils de CAO convergent vers une double représentation du produit : une représentation géométrique (essentiellement B-Rep) et une représentation par des caractéristiques (arbre de features). Chaque application métier est alors contrainte à devoir :

- mettre en place des informations métiers dans le modèle géométrique,
- adapter le modèle géométrique en caractéristiques métiers,
- proposer des analyses expertes reposant sur un modèle construit à la fois par le modèle géométrique et l'application métier.

Les outils de CAO comportent certaines limites [Sadeghi, 08] :

- **l'incomplétude du modèle** : soit la géométrie est un préalable nécessitant un certain niveau de définition avant l'utilisation d'outils experts, soit la géométrie n'est pas un préalable mais les données nécessaires ne sont pas gérées dans le modèle,
- **la redondance des informations** : chaque expertise partage plus que de la géométrie et peut ajouter des informations identiques sur un même objet. Par exemple, il est possible d'affecter un matériau à une même pièce dans deux modules métiers distincts,

-
- **l'hétérogénéité des informations:** chaque expertise utilisant le modèle de conception sauvegarde son travail généralement sous un format qui lui est propre. Ainsi, de nombreux fichiers, correspondant chacun à une application métier, sont incompatibles entre eux. De plus, d'un éditeur à un autre, les outils bien que similaires ne sont pas toujours compatibles sans parler des commandes et des procédures propres à chaque éditeur,
 - **la nécessité de traduire les modèles :** pour obtenir un modèle utilisable par des expertises métiers il faut transformer les informations pour pouvoir passer d'un outil à un autre. Ces transformations se limitent le plus souvent à traduire des formats de conception. Le résultat pouvant être parfois insatisfaisant, ces transformations nécessitent également une conversion manuelle des informations de conception. Cette conversion manuelle risque d'entraîner des pertes d'informations et de temps et de complexifier la traçabilité des informations,
 - **la nécessité de mettre à jour en temps réel :** les modifications apportées par une expertise métier sur le modèle ne sont pas forcément disponibles pour les autres expertises métier. Ainsi, les risques pour les acteurs de la conception travaillant sur un modèle sont que leurs modifications n'aient pas été propagées efficacement et qu'ils utilisent un modèle qui n'est pas forcément à jour,
 - **la réutilisabilité :** la réutilisation d'un modèle de conception n'est pas triviale. En effet, pour que le modèle soit réutilisable, il faut être capable d'extraire les différentes représentations de chaque outil métier.

Ces limites montrent qu'un modèle produit doit, pour être efficace, permettre aux concepteurs :

- d'intégrer différents outils et représentations, dont la représentation géométrique (notion de modèle intégrateur),
- de formaliser les relations entre ces représentations.

2.2 Modélisation produit/processus de conception

Un modèle produit décrit les différentes connaissances relatives au produit. L'ensemble des travaux traitant de la modélisation de produit suggèrent une représentation multivue : fonctionnelle, structurelle, géométrique, physique [Tollenaere, 94]. La modélisation multivue est utilisée pour des raisons à la fois de complexité des produits et de diversité des connaissances issues des divers métiers liés à la conception. La cohérence des connaissances relatives au produit reste, en particulier pour les acteurs de la conception, un problème. Les formalismes utilisés n'assurent en général que la cohésion des connaissances pour renforcer le modèle produit. La cohérence des données provient des outils métiers et non des modèles.

Un historique de différentes modélisations utilisées pour la conception collaborative est présenté dans ce mémoire. Un état de l'art se focalisant sur les principaux modèles produit est présenté par Alain Bernard [Bernard, 00]. Parmi ces travaux, un apport significatif a été réalisé sur les modèles ayant une approche structurelle de la décomposition de produit avec la modélisation par multidécomposition du produit (notion de vues et relation entre vues) : [Kjellberg et Schmekel, 92], [Grabowski *et al.*, 95], [Tichkiewitch, 96]. D'autres modèles produit non abordés dans ce mémoire s'appuient sur une approche sémantique et basée sur les liens avec la définition du produit ([Boothroyd *et al.*, 01], [Swift et Brown, 03]) ou bien encore sur la conception centrée sur les expertises ([Krause *et al.*, 93]).

La démarche de conception peut être présentée comme une succession de tâches mises en évidence par des étapes de l'activité de la conception. Des outils génériques pour modéliser les activités et les processus existent [Vernadat, 96] mais la définition d'un modèle processus de conception consistera plus précisément à spécifier et à guider l'évolution des états du modèle produit tout au long du projet pour aboutir à un produit spécifique. Il consiste également à décrire les flux d'informations traversant les différentes représentations du produit. L'objectif du modèle processus est de modéliser, mais aussi d'instancier et d'exécuter des processus établis pour la conception. **Ce chapitre présente les principaux modèles processus de conception réalisés en association avec un modèle produit.** Un état de l'art plus complet sur les principaux modèles processus est proposé par Hadj-Hamou [Hadj-Hamou, 02].

Les paragraphes suivant ne présenteront que des modélisations intégrant au moins deux dimensions (modèles). Un nombre important d'autres modèles existe. Ils sont parfois bien plus aboutis que ceux présentés dans ce mémoire mais ils n'ont pas tous fait l'objet d'un développement conjoint avec d'autres modélisations or l'intérêt de notre démarche est bien l'interaction entre le produit, le processus et l'organisation.

2.2.1 Modélisation du produit basée sur les flux d'énergie

La représentation fonctionnelle du produit a fait l'objet de nombreuses études à partir des années 90 [Gero, 90], [Umeda *et al.*, 90], [Andreasen, 91], [Tolleneare, 94], [Yannou, 98], [Bernard, 00] [Pailhès *et al.*, 07]. Un modèle produit orienté fonctions est un modèle produit qui prend en compte les fonctions extraites d'un cahier des charges afin de satisfaire aux besoins d'un client. Cette modélisation permet de s'appuyer également sur les normes [NF X 50-151, 91] mettant en avant l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur.

2.2.1.1 Modèle produit orienté fonctions

Le cycle de conception d'un produit est le passage de l'expression du besoin à la définition du produit (cf chapitre 1 : cycle de conception). Pour faciliter ce passage, Dupinet a proposé de représenter le produit au travers de graphes [Dupinet, 91]. Trois graphes ont été développés afin d'intégrer les fonctions, l'architecture et les choix technologiques du produit :

- le « graphe logique » ou « L_graphe » représente les fonctions du produit issues du cahier des charges fonctionnel,
- le « graphe technologique » ou « T_graphe » (voir figure 6) représente les contacts entre les surfaces fonctionnelles,
- le « graphe produit » ou « P_graphe » vérifie la cohérence des deux premiers graphes.

Le modèle produit est composé de cinq éléments (entité, composant, frontière, fonction, et contrainte). L'utilisation des graphes permet de visualiser ces éléments (voir figure 6) :

- l'entité constitue l'objet le plus élémentaire,
- le composant est un assemblage d'entités,
- la frontière est constituée d'un ensemble d'entités qui interagissent avec l'environnement du produit,
- la fonction exprime l'interaction entre des entités,
- la contrainte traduit toutes les dépendances et relations entre les éléments.

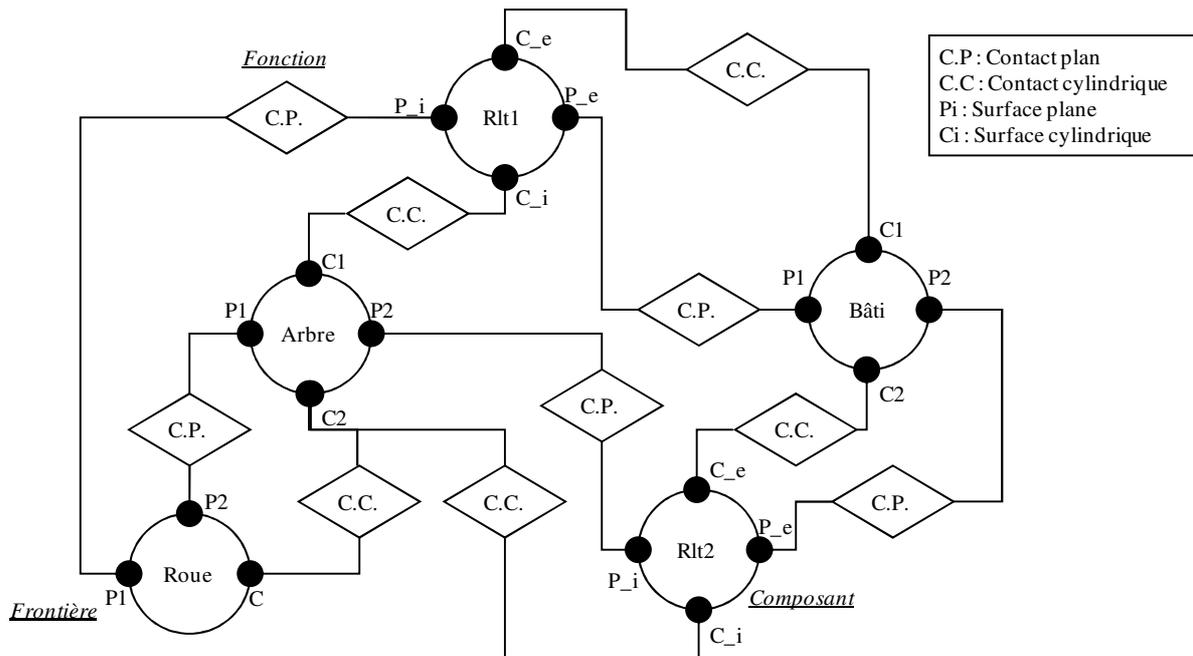


Figure 6 : Graphe technologique ou « T_graphe » d'après Dupinet [Dupinet, 91].

Constant propose de compléter l'approche « graphe produit » de façon à ce que le modèle produit prenne d'abord en compte les fonctions à satisfaire et d'intégrer ensuite une continuité entre les aspects structurel et fonctionnel [Constant, 96]. Pour fournir une description formelle des spécifications, le modèle s'appuie sur le concept de flux physique qui traverse les surfaces fonctionnelles. Un composant est identifié par ses frontières constituées de surfaces fonctionnelles. Le modèle distingue trois classes de fonctions : principales, dépendantes et auxiliaires. La figure 7 présente un exemple de représentation fonctionnelle d'un disque frein.

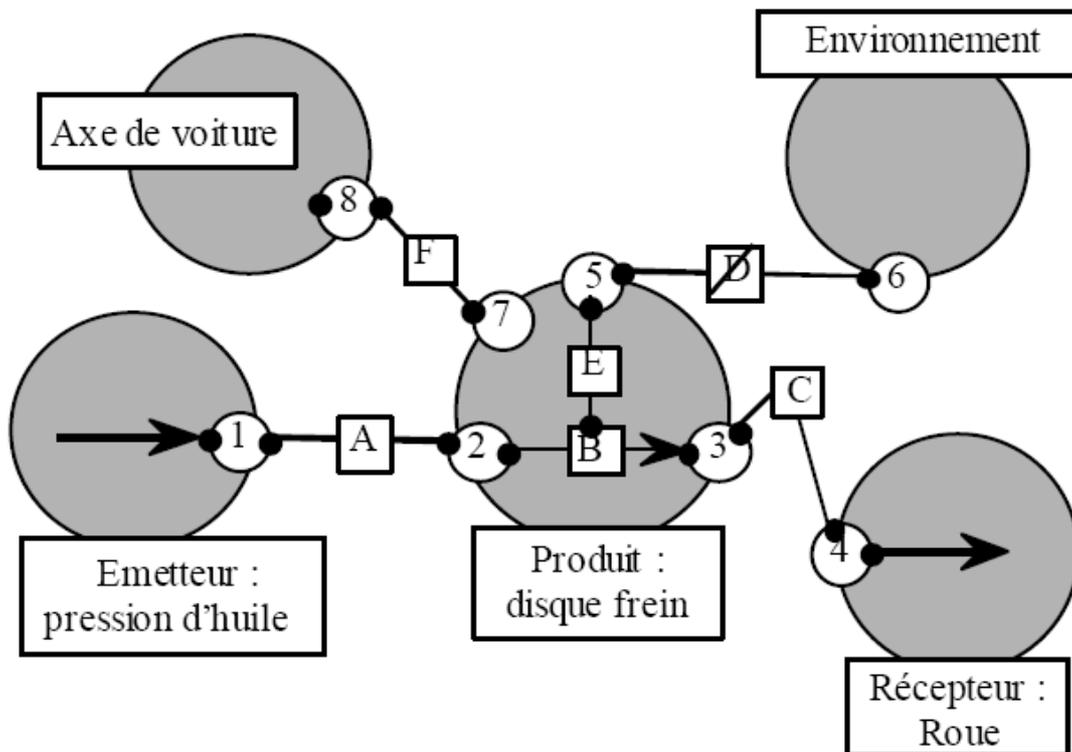


Figure 7 : Modèle fonctionnel du disque frein [Tollenaere et Constant, 97].

Les cases contenant des lettres montrent les liens pouvant être traversés par un flux, alors que les cercles contenant des nombres indiquent les surfaces impliquées par les liens. Une case barrée (par exemple la fonction « D » de la figure 7) signale un « écran » ce qui signifie une opposition à l'action. Pour modéliser un produit, une approche sur trois niveaux est utilisée. Le système est d'abord isolé de son environnement par la définition des frontières (méthode similaire à l'obtention du diagramme des interacteurs ou diagramme « pieuvre »), ensuite on identifie les actions dans lesquelles doit intervenir le produit et enfin, le produit est décomposé en sous-produits pour définir sa structure interne.

2.2.1.2 Modèle produit support à la conduite du processus de conception

S'inspirant des concepts introduits par Dupinet, Eynard propose un modèle produit pour décrire les projets de conception en termes d'objectifs à atteindre [Eynard, 99]. Le formalisme proposé est constitué de quatre éléments : fonctions, contraintes métiers, entités technologiques et entités frontières : voir figure 8.

- Les fonctions, représentées par des rectangles, définies par des paramètres et des contraintes, sont le plus souvent des objectifs de conception d'ordre plutôt technique (par exemple « COULISSER »).
- Les contraintes métiers font partie intégrante des fonctions. Chaque acteur de la conception exprime son point de vue sur une fonction.
- Une entité technologique, représentée par un grand cercle, est un objet conceptuel et cohérent technologiquement et sémantiquement vis-à-vis d'une fonction. Abstrait en début de conception il devient peu à peu un objet physique.
- Les entités frontières, représentées par de petits cercles, assurent l'interface entre les entités technologiques et les fonctions.

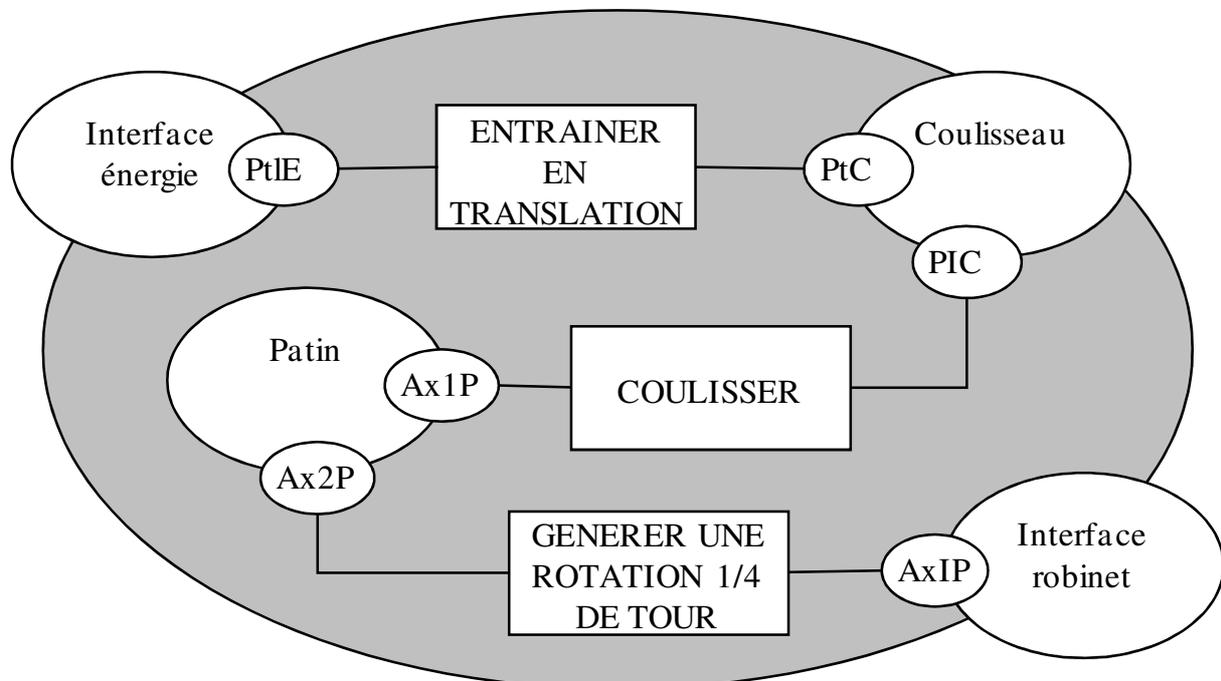


Figure 8 : Etat du modèle produit d'un « Actionneur multi-énergie » [Eynard, 99].

Ce modèle produit évolue progressivement d'un état de connaissance à un autre au cours du processus de conception. Plus les fonctions sont précisées plus le modèle produit s'enrichit d'états en états.

2.2.2 Modèle processus associé aux modèles produit basé sur les flux d'énergie

Conjointement aux travaux réalisés sur la modélisation du produit basée sur les flux d'énergie, la modélisation du processus de conception a été prise en compte pour permettre de suivre l'évolution du modèle produit. Les paragraphes suivants présentent les modèles processus associés aux modèles produit décrits précédemment.

2.2.2.1 Modèle processus à base de graphes « Etat-Transition »

Le modèle processus à base de graphes « Etat-Transition » (figure 9) [Dupinet, 91] est associé au modèle produit orienté fonctions du paragraphe 2.2.1.1. Le processus de conception est divisé en états qui correspondent à l'ensemble des informations présent dans le modèle produit avant la prise de décision d'un concepteur ou plus généralement d'un décideur au moment d'un choix. Le passage d'un état de conception à un autre est déclenché par un choix.

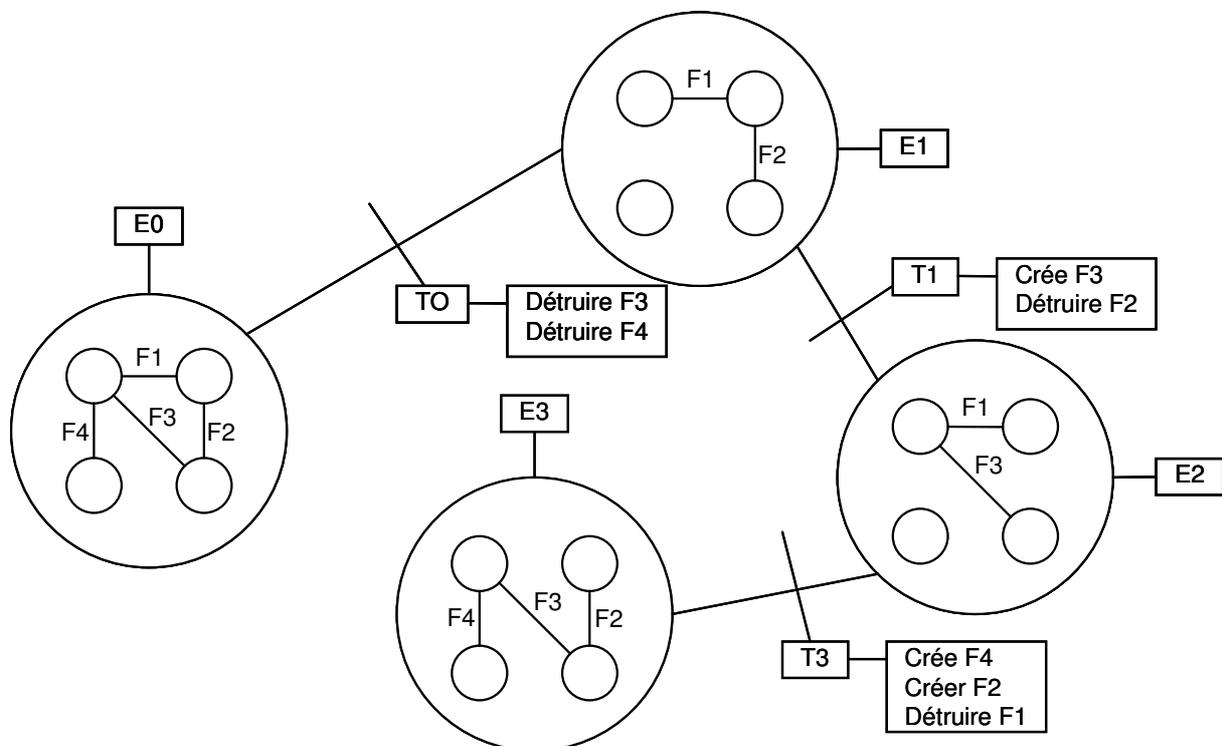


Figure 9 : Exemple de graphe « Etat-transition » d'après Dupinet [Dupinet, 91].

Le processus de conception proposé est conforme aux étapes du cycle de conception mentionnées dans le chapitre 1 et se décompose en cinq phases que sont :

- l'élaboration et la transcription du cahier des charges,
- l'analyse fonctionnelle et technique du produit,
- la conception des détails,
- l'optimisation après choix de fonction,
- la simulation pour visualiser le comportement du système.

Pour mémoriser les choix durant le cycle de conception, l'auteur utilise des graphes « Etat-transition » qui relient les différents états des graphes liés au produit.

Ainsi, pour gérer le modèle produit, les mécanismes suivant ont été définis :

- recherche de solution : correspondant à la sélection de composants basée sur la logique,
- instanciation généralisée : permettant à chaque objet d'avoir des caractéristiques différentes des autres,
- raffinement : consistant à affiner la connaissance d'un composant en fonction des exigences technologiques et enfin le mécanisme de parcours de graphes.

2.2.2.2 Réseaux GRAI R&D

Les réseaux GRAI R&D servent à représenter le processus d'ingénierie comme une succession de transformations. Eynard [Eynard, 99] considère que, contrairement aux hypothèses simoniennes [Le Moigne, 99], une représentation des activités de conception ne peut dissocier « la phase qui a pour but de comprendre et de formuler le problème, de celle qui va rechercher, imaginer et proposer un ensemble d'alternatives de solutions ».

L'auteur propose donc de regrouper les phases d'intelligence et de conception en une seule activité : l'activité de conception. Par contre, la phase de sélection peut être considérée à part, « du moment où il est fourni au décideur les éléments nécessaires à sa prise de décision ». Les activités d'ingénierie, selon GRAI R&D sont donc modélisées par une activité de conception et par une activité de décision. L'activité de conception est dite divergente alors que l'activité de décision est dite convergente. L'activité de conception revêt un caractère créatif et propositionnel, en effet, elle augmente la connaissance du produit alors que la prise de décision explicite, argumente et vient statuer, valider la proposition. Les réseaux GRAI R&D envisagent également un autre type d'activité qui se limite à la transformation, sans création et à caractère procédural : c'est l'activité d'exécution.

Ce modèle processus servira de modèle processus de conception à l'environnement PPO retenu dans ce mémoire. Il fera donc l'objet d'une description détaillée dans le chapitre 3.

2.2.3 Synthèse

Le modèle produit orienté fonctions de Dupinet est prévu pour être utilisé **à partir de la phase de conception architecturale** ce qui représente une limitation forte puisque le transfert de spécifications doit être établi tout au long du cycle de conception et en particulier en conception préliminaire. De plus, l'essentiel des travaux sur ce modèle produit s'est porté sur son implémentation dans un outil de CAO et seules les spécifications techniques et plus particulièrement géométriques sont prises en compte.

Les améliorations apportées par Constant sur la modélisation du produit la rende très fine ce qui a pour inconvénient de complexifier assez rapidement le modèle. Pour que le modèle soit pleinement utilisable, la décomposition du produit doit être très poussée ce qui peut freiner son utilisation par un concepteur. Néanmoins le principe de propagation de flux est intéressant car il met rapidement en évidence les flux néfastes poussant ainsi le concepteur à trouver des solutions qui permettent d'y remédier.

Le modèle produit proposé par Eynard permet la transcription des résultats d'une analyse fonctionnelle (graphe d'interactions, diagramme FAST, ...) par l'intermédiaire de

l'entité fonction. La satisfaction des fonctions tout au long du projet y est facilitée grâce au formalisme. L'entité technologique assure le lien avec les éléments de modèles géométriques ou physiques employés par les concepteurs.

Le modèle processus « Etat-transition » ayant été développé en même temps qu'un modèle produit, il assure, *a priori*, à cette modélisation une bonne compatibilité entre les modèles. Malheureusement, Dupinet avoue, à propos de son modèle processus, ne pas avoir « développé aussi profondément que son importance le nécessite » [Dupinet, 91]. Ce modèle ne retient que l'historique des décisions prises et non pas son cheminement à savoir les activités de la conception. Les informations permettant d'effectuer les choix ne sont pas conservés. Les spécifications liées au processus ou à l'organisation ne sont pas gérées. Même si l'évolution du modèle produit en états s'opère par « nouvelle décision du concepteur », l'aspect décisionnel n'est traité qu'au travers du regard du concepteur et non pas de l'ensemble des acteurs de la conception. La modélisation proposée n'intègre pas les ressources (humaines ou matérielles) qui font évoluer le produit. Aucune gestion des ressources n'y est présente, seuls le produit et son évolution sont pris en compte.

Les réseaux GRAI R&D fournissent un modèle processus pertinent pour la formalisation des activités d'ingénierie. Elle ne se limite pas à décrire l'évolution du modèle produit mais représente les activités permettant cette évolution. En intégrant les ressources, il est alors possible d'y associer un système de gestion des ressources (matérielles ou humaines) afin d'optimiser leur utilisation. Certaines activités nécessitent des objectifs. Ces objectifs pilotent le processus de conception et donc l'état du modèle produit. L'évolution du modèle produit est le fruit des décisions provenant d'un système qui pilote l'ensemble.

Les travaux les plus récents sur la modélisation du produit cherchent à mettre ce type de modèle au cœur des expertises de conception afin de s'affranchir des outils de CAO [Dufaure et Teissandier, 08] [Riou et Mascle, 09] (figure 10).

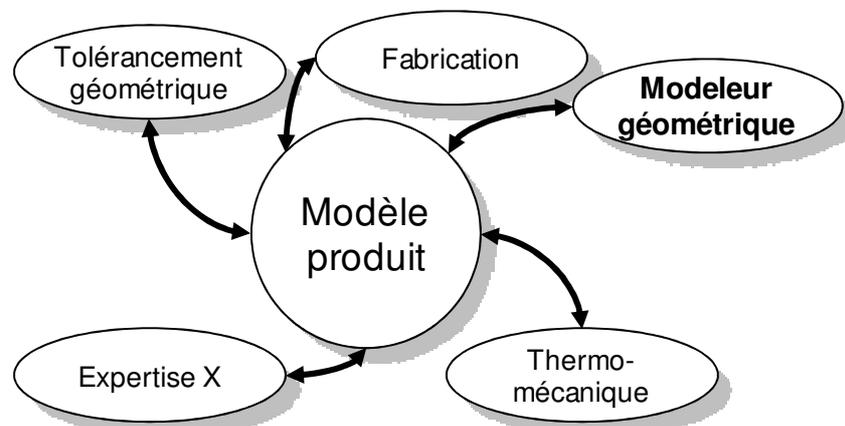


Figure 10 : Le modèle produit au cœur des expertises de conception : adapté de [Dufaure et Teissandier, 08].

2.2.4 Modélisation du produit par domaines

Il existe d'autres types de modélisation produit. Parmi eux, la modélisation du produit par domaines qui a également fait l'objet de développement parallèlement à une modélisation du processus de conception. De ce fait, leur description est pertinente dans le cadre de ce mémoire.

2.2.4.1 Modèle produit multivue

Les travaux de thèse de Vargas [Vargas, 95] et Saucier [Saucier, 97] proposent une modélisation du produit et du processus de conception en s'appuyant sur un concept de multivue du produit. Ces travaux font partie intégrante du projet européen *DEKLARE (DEsign KnowLedge Acquisition and. Redesign Environment)* dans lequel le groupe PSA Peugeot Citroën a pris part. Yvars [Yvars, 01] a fait évoluer ces travaux afin de développer l'environnement *KoMoD (KnOwledge MOdeling for Design)*.

Le modèle produit proposé par Saucier est un méta-modèle multivue permettant la description d'une famille de produits [Saucier, 97]. La description du produit s'articule autour de trois points de vue de base (structurel, fonctionnel et géométrique). L'objectif principal du modèle est d'intégrer le point de vue géométrique au même titre que d'autres points de vue.

- le point de vue fonctionnel décrit, par l'intermédiaire d'un arbre de fonctions, les différentes fonctionnalités auxquelles toute la classe de produits doit répondre,
- le point de vue structurel est un graphe de décomposition structurelle du produit qui intègre les différentes variantes existantes dans la classe de produits,
- le point de vue géométrique est, à la différence des autres points de vue qui servent à décrire le produit global, utilisé pour représenter chaque objet par des éléments géométriques élémentaires pouvant être fournis par les modeleurs CFAO.

Le concepteur peut travailler sur le modèle qu'il préfère. S'il souhaite réutiliser une pièce existante, il utilisera le modèle physique. Les fonctions seront instanciées à partir des entités de cette pièce. S'il décide de travailler sur les fonctions, il utilisera le modèle fonctionnel. La pièce se construit progressivement par les entités identifiées dans le modèle. La cohérence des liens entre les différentes vues est ainsi conservée. Le point de vue géométrique sert de passerelle entre le modèle produit et le modeleur géométrique pour permettre la visualisation de la géométrie du produit. La géométrie du produit ne peut pas être modifiée directement dans le modeleur, le concepteur doit rentrer les valeurs dans le modèle au travers des points de vue fonctionnel et structurel.

Le modèle produit de Saucier a été repris et amélioré par les travaux Yvars [Yvars, 01]. Le méta-modèle produit proposé s'articule toujours autour de trois points de vue de base : structurel, fonctionnel et géométrique (voir figure 11). Pour décrire une classe de produits, les trois modèles de départ utilisent des mécanismes de contraintes. Les contraintes définissent alors les relations d'agencement des composants et les diverses configurations d'un produit.

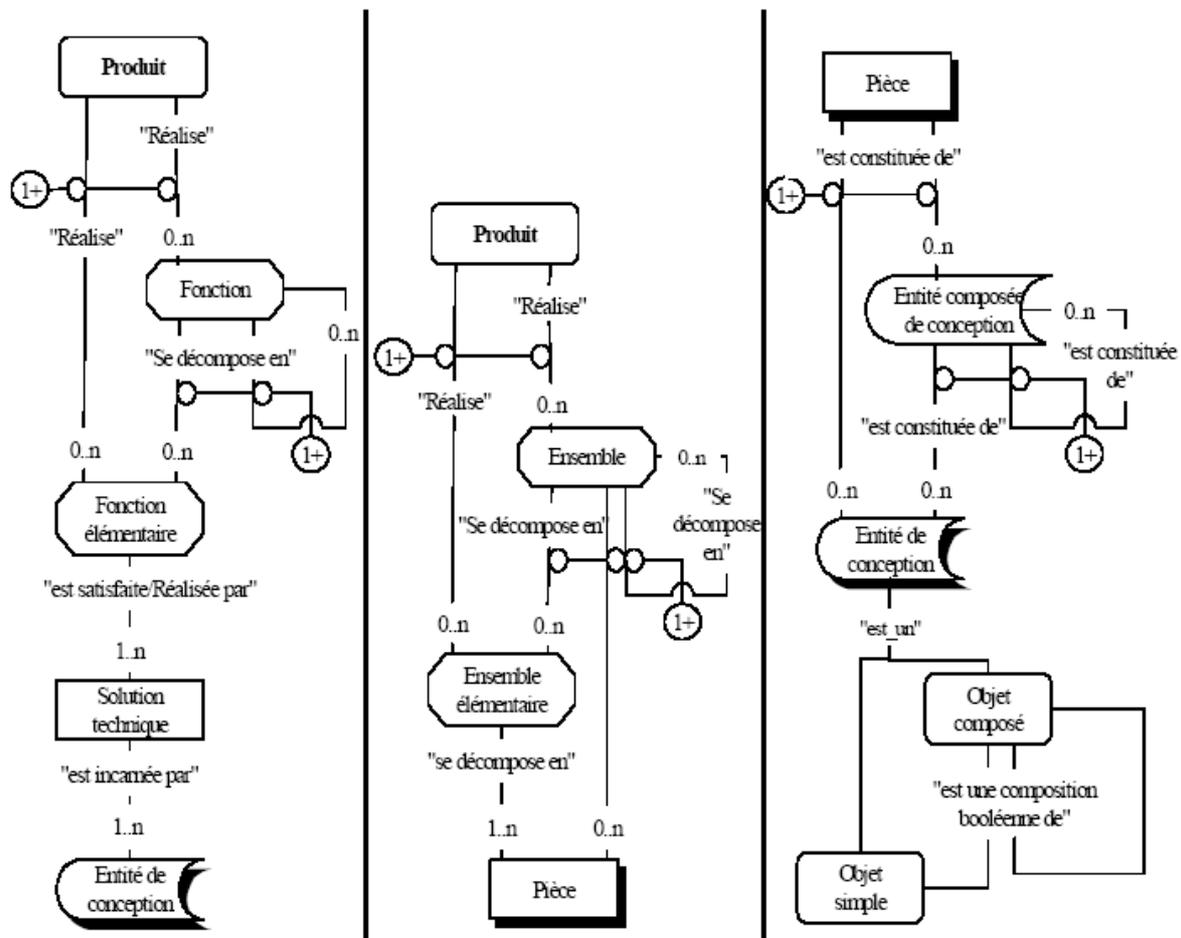


Figure 11 : Les trois vues du modèle produit d'après Sellini [Sellini, 99] et Yvars [Yvars, 01].

2.2.4.2 Modèle produit pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances

La connaissance d'une entreprise constitue son patrimoine [Bissay *et al.*, 08] et participe au bon déroulement d'un projet de conception. La mémoire d'une entreprise est définie par les représentations explicites et persistantes de ces connaissances [Nagendra et Plaza, 96] [Pomiam, 96]. Rassembler et réutiliser toute cette mémoire constituent deux des principales difficultés pour une entreprise. Les méthodes génériques de capitalisation des connaissances ne permettent pas d'identifier une connaissance spécifique à partir d'éléments formalisés pour un système *PLM* [Bissay *et al.*, 08].

Pour représenter toutes les informations liées à un produit dans une même base de connaissances, Harani a développé un modèle produit permettant de capitaliser le savoir-faire et de réutiliser les connaissances d'anciens projets [Harani, 97].

Le modèle est construit sur trois niveaux conceptuels. Le niveau d'abstraction est défini par un méta-modèle où tous les concepts de base sont définis. Le modèle produit est construit de manière à :

- permettre la définition du produit à partir des spécifications extraites du cahier des charges,
- maintenir à jour la connaissance produit,
- conserver l'historique de conception à des fins de réutilisation ultérieure.

2.2.5 Modélisation du processus associée aux modèles produit par domaines

2.2.5.1 Modèle graphe du processus de conception

L'objectif du modèle processus proposé par Vargas [Vargas, 95] est de formaliser la connaissance de manière déclarative. Ce modèle a été développé en complément du modèle produit de Saucier [Saucier, 97]. Le processus de conception y est représenté comme une suite de tâches à effectuer. Le modèle processus illustré figure 13, est alors formé d'un graphe ET/OU composé de tâches, de méthodes et de méthodes élémentaires. Les tâches sont les problèmes à résoudre, les méthodes représentent les manières de résoudre des tâches alors que les méthodes élémentaires permettent de faire les calculs et de dialoguer avec l'utilisateur. Ce graphe fournit une structure détaillée des problèmes à résoudre. Chaque tâche contient plusieurs méthodes qui peuvent chacune être dédiée à une ou plusieurs tâches. La mise en œuvre du modèle processus nécessite deux étapes :

- la définition statique qui correspond à l'identification et à la hiérarchisation des problèmes à résoudre,
- la définition dynamique, qui décrit le comportement du modèle par des algorithmes de résolution des tâches.

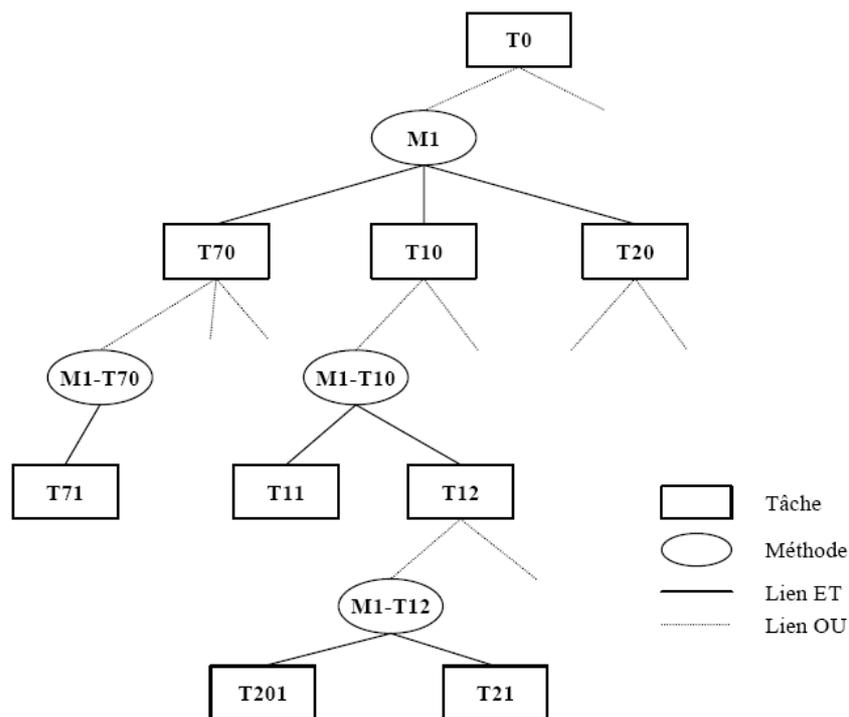


Figure 13 : Arbre tâches/méthodes d'après Vargas [Vargas, 95].

L'instanciation du modèle produit est obtenue en modélisant le raisonnement du concepteur sous forme de stratégies de résolution. A l'aide du modèle processus, le concepteur effectue des choix (d'une tâche, d'une méthode et de valeurs pour un composant). Chaque choix est soumis à un ensemble de contraintes. La recherche de solution est basée sur les techniques de propagation de contraintes. Les contraintes de structure sont utilisées pour modéliser les relations booléennes de l'arbre tâches/méthodes. Les contraintes de résolution permettent de limiter les valeurs possibles des paramètres de chaque composant. Les valeurs des paramètres peuvent être sélectionnées par une heuristique ou calculées par un algorithme.

Les méthodes sont également choisies par une heuristique ou en fonction de certaines priorités prédéfinies. Quand un choix s'avère incohérent, un mécanisme de retour arrière pour itérer la conception est utilisé mais la vision des enchaînements de tâches n'est pas claire [Eynard, 99].

Une extension de ce modèle a été introduite par Lenguin [Lenguin, 96], Sellini [Sellini, 99] et Yvars [Yvars, 01]. Les connaissances de stratégie de conception peuvent être modélisées de manière déclarative par des connecteurs posés entre les tâches et les méthodes. Les connecteurs logiques affectent alors l'état des tâches modélisées par des relations logiques (et, ou, implication).

2.2.5.2 Modèle processus pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances

Harani a proposé un modèle processus de conception multiniveau [Harani, 97] (voir figure 14). L'objectif étant de fournir les supports adéquats à la formalisation de tout processus, d'aider à spécifier les étapes de conception et de pouvoir conserver les connaissances des concepteurs en gardant une trace de leurs raisonnements.

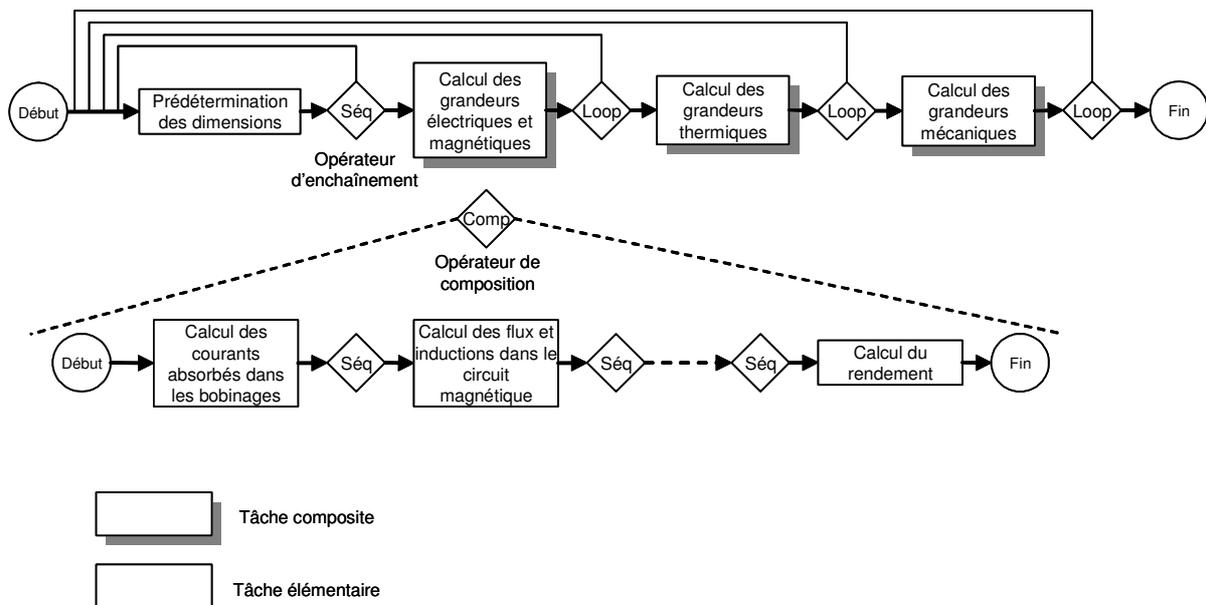


Figure 14 : Modèle processus multiniveau [Harani, 97].

La modélisation s'appuie sur quatre concepts :

- le concept processus représente l'enchaînement des tâches du déroulement de la conception en mettant en évidence la description des différentes étapes clés de l'activité de développement du produit,
- le concept tâche définit l'ensemble des tâches, qu'elles soient élémentaires ou composites (c'est-à-dire décomposables en ensembles de sous-tâches), permettant de représenter le déroulement des étapes du processus de conception,
- le concept ressource regroupe l'ensemble des supports matériels ou humains nécessaires à l'exécution des tâches,
- le concept état concerne le produit, le processus et les tâches. Il permet de conserver leurs états d'exécution afin de garder une traçabilité du processus.

2.2.6 Synthèse

D'un point de vue formel, le modèle produit proposé par Saucier est pertinent. Il s'appuie sur une double vision de la décomposition du produit : la décomposition fonctionnelle et la décomposition structurelle. Toutefois, le fait de ne pas avoir regroupé les deux visions en un unique modèle peut poser problème. En effet, si une pièce représente la structure du produit elle peut également répondre à une ou plusieurs fonctions. Or, avec cette modélisation, il n'est pas possible de symboliser, par un lien « fonctionnel » entre les pièces du modèle physique, une fonction entre deux pièces. L'objectif de cette modélisation est de permettre d'ajouter d'autres vues du problème afin de s'adapter aux besoins du concepteur. Le modèle géométrique apparaît alors comme un rajout qui n'a pour utilité que de permettre de représenter, dans un modèleur géométrique, les données géométriques présentes dans les deux autres modèles. Les modifications apportées dans le modèleur géométrique ne peuvent modifier la définition du produit dans les vues fonctionnelles et structurelles. De plus, la notion de comportement est absente de cette modélisation alors qu'elle est présente dans un grand nombre de travaux dont les plus récents.

Le modèle processus proposé par Vargas est contraint aux activités de conception routinière puisqu'il s'appuie sur la décomposition du produit d'une part et des processus antérieurs d'autre part. C'est une limitation forte mais la modélisation proposée est intéressante. Cette démarche est performante quand le processus est connu à l'avance, il suffit alors de trouver « un chemin » parmi les processus disponibles pour avancer dans la conception du produit. Informatiquement cela implique de connaître les tâches, les méthodes ainsi que leurs liens. Pour autant on peut imaginer utiliser cette démarche pour une conception innovante où le processus serait conçu en même temps que le produit afin d'être capitalisé pour des projets futurs.

Les modèles produit et processus proposés par Harani remplissent leurs objectifs de capitalisation et la réutilisation des connaissances. Ce couplage permet d'assurer la cohérence de l'approche proposée [El Khalkhali, 02]. Le concept de point de vue peut par contre générer une modélisation du produit relativement complexe car chaque acteur peut créer sa propre vision du modèle produit. De ce fait, les données risquent d'une part d'être redondantes au sein du modèle produit et d'autre part, les liens entre visions peuvent être difficiles à mettre en place.

Il est à noter, en ce qui concerne les tâches du processus de conception, qu'elles sont séquentielles et calculatoires : les tâches sont « automatisables ». De ce fait, le modèle processus proposé par Harani est limité à des conceptions routinières où le processus de conception est clairement connu, à moins que cette impression provienne de l'exemple retenu. Il apparaît alors que la résolution d'un problème de conception revient à suivre des étapes (très détaillées dans l'exemple) pour arriver au bout de la conception. L'aspect décisionnel du concepteur n'est pas ou peu présenté, il est donc peu envisageable d'utiliser un tel modèle en conception créative. Les ressources mises en place se limitent à des méthodes de résolution sans mentionner les ressources humaines ou matérielles.

2.3 Modélisation produit/processus de conception intégrant les ressources

2.3.1 Modèle FBS-PPRE

Ce modèle générique est destiné à la représentation des processus d'entreprise : Processus, Produit, Ressources et Effets extérieurs. Il présente les avantages suivants :

- une distinction entre la nature (temporelle, organisationnelle, logicielle, matérielle, énergétique) et les rôles des objets de l'entreprise (processus, produit, ressource, effets externes),
- une modélisation unifiée de tous les objets de l'entreprise indépendamment de leur nature,
- une notion de comportement définie comme le résultat d'une interaction d'un objet avec un autre objet jouant un rôle de processus.

Le modèle FBS-PPRE s'intéresse aux étapes de la vie des produits au sein de l'entreprise alors que celles relatives à la phase d'utilisation ne sont pas incluses. La vue dynamique du système y est considérée.

2.3.1.1 Origines du concept FBS

La méthode de conception FBS (Function-Behavior-State) a été développée par Gero [Gero, 90] et rapidement reprise par Umeda [Umeda *et al.*, 90]. Cette méthode comporte plusieurs étapes et leurs modèles associés. La première étape est la définition des besoins, exprimée dans un cahier des charges par le client. Les besoins expliquent pourquoi un objet est ce qu'il est. L'analyse de ces besoins (par une analyse fonctionnelle par exemple) permet de déduire l'ensemble des fonctions (*function*) qui vont caractériser le produit. Les concepteurs déterminent alors les comportements (*behavior*) associés au produit. Ces comportements doivent permettre au produit de satisfaire les fonctions attendues. Enfin, les comportements du produit amènent le concepteur à élaborer sa structure (*state*). Cette structure donne des informations sur la manière dont les différents composants du produit sont rassemblés et représente, aux yeux du concepteur, l'objectif final du concept FBS. La difficulté de cette approche vient des relations entre les fonctions et les comportements qui ne sont pas bijectives. En effet, une fonction peut être satisfaite par plusieurs comportements. De plus, ce modèle donne une perception globale du produit sans jamais proposer une formalisation des vues Fonction, Structure, Comportement [Dorst et Vermaas, 05]. Aussi, d'autres modèles dérivés de cette perception ont été proposés en vue d'enrichir le modèle FBS classique (modèle générique Core Product Model (CPM) [Sudarsan *et al.*, 05], ...). Parmi eux le modèle FBS-PPRE étend le concept au-delà de la modélisation du produit.

2.3.1.2 Présentation du modèle FBS-PPRE

Le modèle FBS-PPRE (Functional Behaviour Structure – Product Process Resources, External effect) propose d'utiliser le modèle FBS pour décrire d'autres objets que le produit. On obtient ainsi une approche « globale » et plus homogène.

Labrousse [Labrousse, 04] propose le modèle FBS-PPRE afin d'intégrer un modèle produit à un modèle processus. Le modèle FBS-PPRE est construit autour des notions de produit, de processus, de ressource et d'effet extérieur (PPRE) couplées dans un modèle générique basé sur les concepts de fonction, de comportement et de structure (FBS) : voir figure 15 et figure 16.

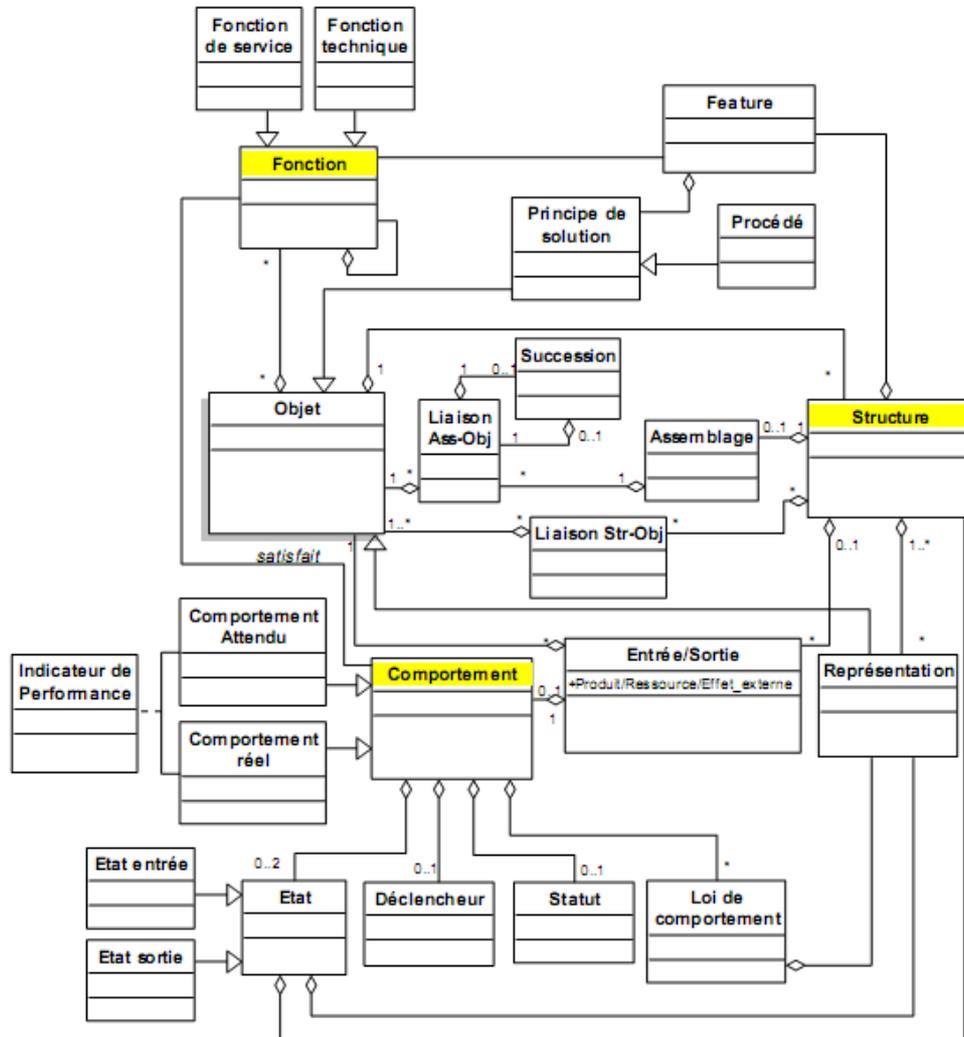


Figure 15 : Diagramme de classes UML du modèle FBS-PPRE [Labrousse, 04].

L'objectif de cette modélisation est d'améliorer l'intégration et la traçabilité des éléments des processus d'entreprise afin d'analyser et d'extraire les éléments réutilisables dans le processus de conception. La modélisation de la dynamique des informations est obtenue par la notion de processus qui permet de définir de manière cohérente les comportements des différents objets manipulés.

Le modèle FBS-PPRE ne fait pas de distinction à la base entre Produit, Processus et Ressource qui sont généralisés en « Objet ». Les concepts de Produit, Processus et Ressources apparaissent alors à travers des rôles que jouent les objets les uns par rapport aux autres. Un objet peut être :

- matériel, c'est-à-dire concrétisable,
- organisationnel,
- temporel qui seul pourra jouer un rôle de processus,
- logiciel (incluant les logiciels et les documents qu'ils permettent de générer),
- énergétique.

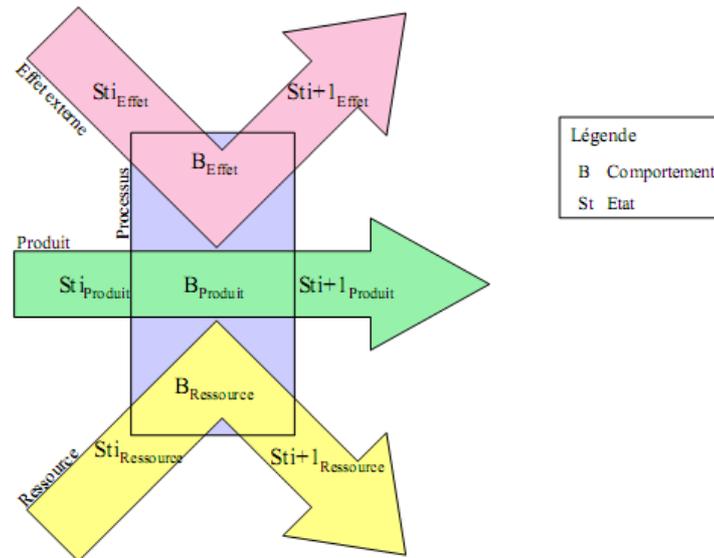


Figure 16 : Gestion de la notion de comportement dans le modèle FBS-PPRE [Labrousse, 04].

L'auteur distingue les notions d'objet entreprise et d'objet. Le premier sert d'élément générique afin de permettre une gestion plus homogène et donc plus efficace des notions de processus, de produit et de ressource. L'objet d'entreprise est défini comme « une entité constitutive de l'entreprise et/ou manipulée par elle et qui joue un rôle dans son fonctionnement ». Les effets externes ne pouvant pas être inclus dans cette notion générique, ceux-ci étant dans certains cas extérieurs à l'entreprise et donc non contrôlables par elle, la notion d'objet est définie comme « une entité qui joue un rôle dans le fonctionnement du système considéré ».

L'hypothèse est faite qu'un objet peut changer de rôle pendant son cycle de vie. En prenant l'exemple de l'objet « plan CAO » on constate que celui-ci peut être pour un concepteur le produit de son étude mais également une ressource du processus de création d'une gamme d'usinage. L'objet « gamme d'usinage » revêt ici le rôle de produit mais devient un objet temporel lorsqu'il a le rôle de processus vis-à-vis des objets jouant un rôle de ressource (machines outils) et de produit (pièce fabriquée).

Le modèle FBS-PPRE a fait l'objet du développement d'un démonstrateur de système d'information (voir figure 17) dont les fonctionnalités sont suffisantes pour tester sa cohérence sur des scénarii industriels.

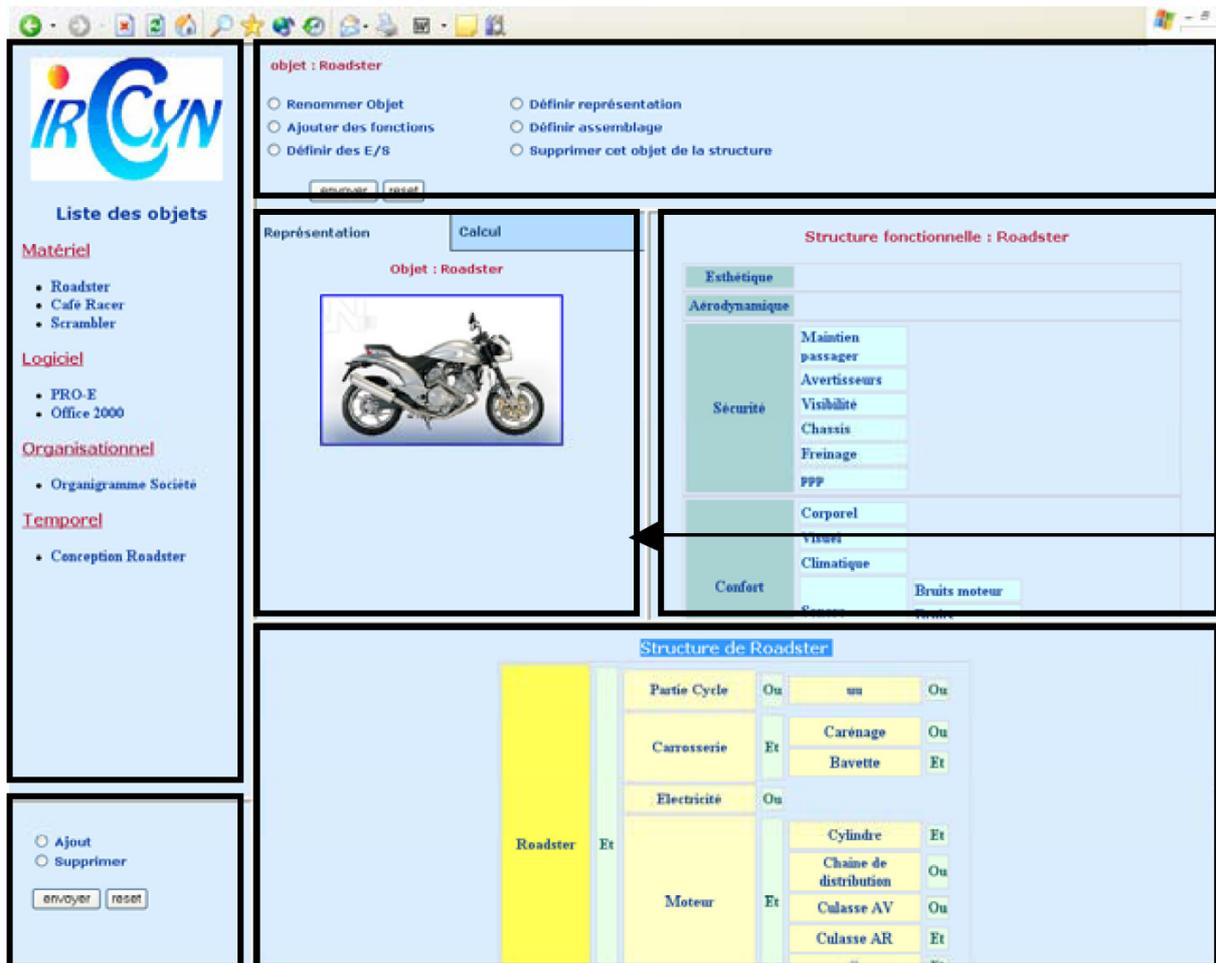


Figure 17 : Interface du démonstrateur de système d'information FBS-PPRE : extrait de [Labrousse, 04].

2.3.2 Modèle PPO

Le modèle Produit Processus Organisation (PPO) a été développé dans le cadre du projet IPPOP¹. Le modèle PPO n'est pas un nouveau modèle dans le sens où l'objectif est avant tout de lier des modèles existants pour la conception. Il s'articule autour de trois modèles : les modèles Produit, Processus et Organisation [Roucoules *et al.*, 06]. Le modèle PPO possède comme principales caractéristiques d'être un modèle simple et extensible [Sadeghi, 08].

Le modèle PPO est au centre des expertises qui gravitent autour : voir figure 18. Ces expertises peuvent être liées au produit (expertises des bureaux d'études et des méthodes par exemple) mais peuvent également être liées à des aspects organisationnels, décisionnels, etc.

¹ IPPOP : Le projet IPPOP (Intégration Produit – Processus - Organisation pour l'amélioration de la Performance en ingénierie) est supporté par les ministères de l'industrie et de la Recherche dans le cadre du Réseau National des Technologies Logicielles. Il a été labellisé le 10 décembre 2001 pour une durée de 36 mois et a eu pour objectif d'intégrer les connaissances liées au produit et au processus pour contribuer à l'augmentation du patrimoine technologique de l'entreprise et à la maîtrise de la conduite de l'activité de conception.

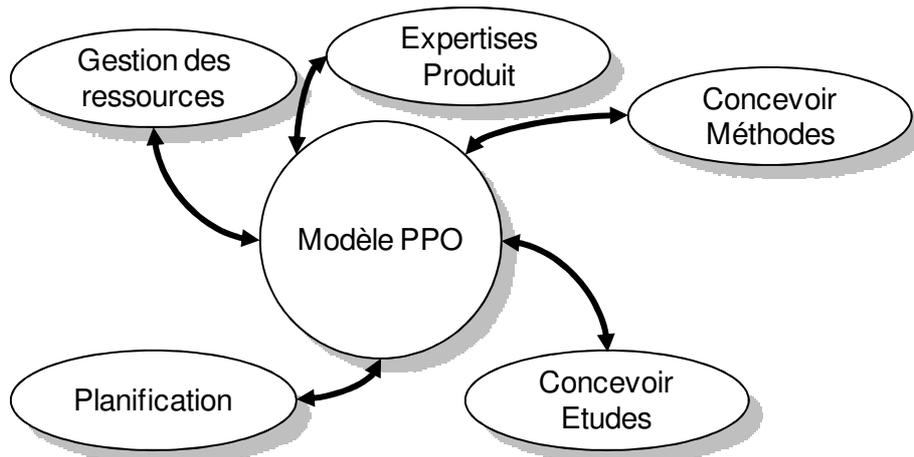


Figure 18 : Le modèle PPO au centre de toutes les expertises liées au projet.

La description présentée dans ce chapitre est succincte car elle fait l'objet d'un approfondissement dans le chapitre suivant. La présentation ici faite permet de compléter l'évolution historique de la modélisation en conception collaborative et en particulier de comparer ce modèle avec le modèle FBS-PPRE.

2.3.2.1 Modèle de référence

Le modèle de référence du modèle PPO est basé sur la méthodologie GRAI. Cette méthodologie a été développée au sein du groupe GRAI (Groupe de Recherche en Automatisation Intégrée) appartenant au Laboratoire d'Automatique et de Productique de l'Université Bordeaux 1. Elle repose depuis le milieu des années 80 sur les systèmes de production ou industriels des entreprises et des organisations. Cette méthodologie propose une modélisation d'entreprise composée de cinq produits méthodologiques : GIM (GRAI Integrated Method), GEM (GRAI Evolution Method) [Malhene, 00], ECOGRAI [Bitton, 90], BENCHGRAI, GRAI MESSAGE [Kleinhans, 99], GRAI R&D [Girard, 99], GRAI Ingénierie [Merlo, 03]. L'ensemble de ces travaux est fondé sur le modèle conceptuel de référence GRAI [Doumeingts, 84] qui comprend un modèle global et un modèle local du système à représenter. Le modèle de référence GRAI permet de visualiser les liens entre chaque modèle. **L'aspect décisionnel est pris comme vecteur d'intégration.** La quantité de données manipulées pendant le cycle de conception croissant de manière importante, une gestion des données est opérée par plusieurs modèles capables de représenter l'entreprise et son système de conception.

Le modèle de référence (voir figure 19) dissocie le système décisionnel (pilotant) du système technologique (pilotée) :

- le système décisionnel, comportant les centres de décisions, est modélisé par le modèle organisation GRAI R&D et le modèle processus GRAI,
- le système technologique, comportant les centres de conception associés aux centres de décision, est modélisé par le modèle processus GRAI R&D et le modèle produit IPPOP.

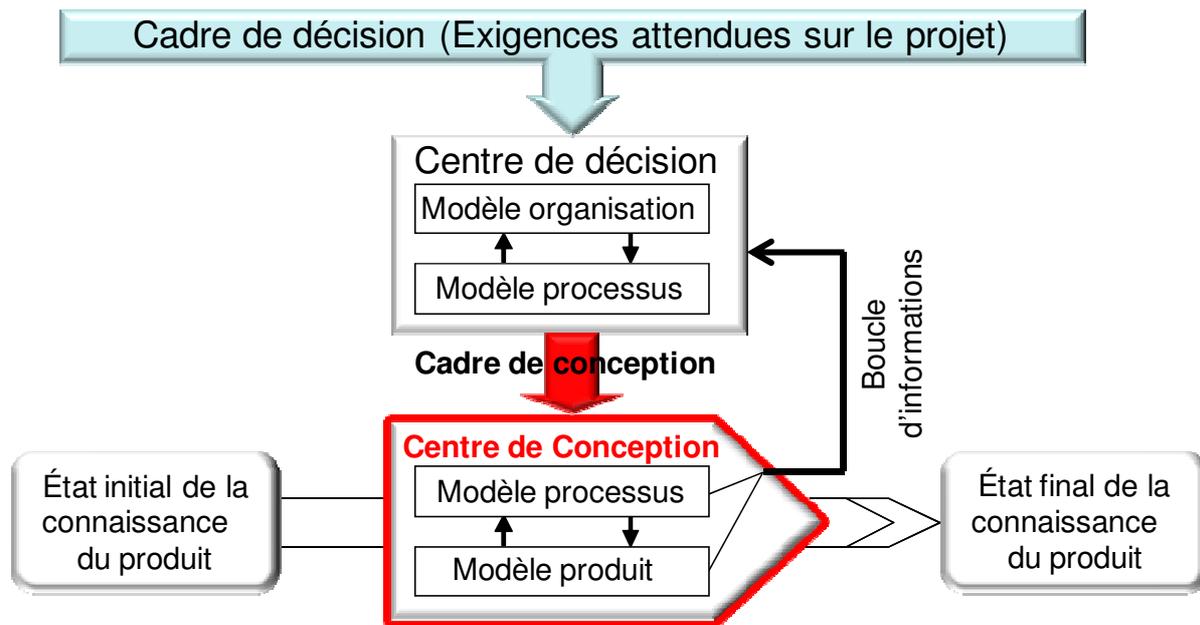


Figure 19 : Modèle de référence d'un système de conception : adapté de [Robin, 05].

2.3.2.2 Modèles intégrés dans le cadre du projet IPPOP

Modèle organisation

Le modèle organisation retenu dans le projet IPPOP identifie les objets relatifs au système décisionnel (système pilotant) et au système technologique (système piloté). Les relations entre ces deux niveaux d'action y sont prédéfinies. Ce modèle est issu des travaux de Girard [Girard, 99] [Girard et Doumeingts, 04]. Nommé structure GRAI R&D, ce modèle est une extension du modèle GRAI [Doumeingts, 84], [Zanettin, 94], [Marcotte, 95] adaptée à la conception.

Les travaux de Nami [Nami, 95] ont été les prémices de l'utilisation de la méthodologie GRAI appliquée à l'ingénierie de produits. Doumeingts [Doumeingts *et al.*, 96] et Girard [Girard *et al.*, 98] ont montré que le modèle conceptuel de référence était applicable à tout système et y compris au système d'ingénierie. C'est pourquoi la structure GRAI R&D permet de mettre en œuvre la proposition de généralisation de transfert de spécifications projet.

Modèles processus

Le modèle PPO utilise deux modèles processus qui peuvent être identiques. Le système décisionnel adopte généralement le modèle processus issu de GRAI à savoir les réseaux GRAI. Le système technologique emploie un modèle processus dit « de conception ». Les réseaux GRAI ne permettent pas de représenter l'évolution des états du produit. Seul ce dernier modèle de processus a fait l'objet de développement lors du consortium IPPOP.

De ce fait, le modèle processus retenu dans IPPOP, représenté par la figure 20, est basé sur deux concepts fondamentaux que sont les tâches (Task) et les données techniques (Product Data) :

- les tâches représentent l'activité à réaliser par un acteur dans le but de spécifier une donnée technique qui caractérise le résultat de l'objectif de conception assigné à chaque tâche,

- les données techniques sont les objets sur lesquels agit la tâche pour réaliser son objectif.

Autour de ces concepts viennent se rattacher les éléments précisant la nature, l'organisation et les données manipulées par le processus. Le concept de « tâches » est au centre du modèle de processus et représente l'élément de décomposition de ce dernier. Un processus est décomposable en tâches, elles-mêmes décomposables en d'autres tâches plus élémentaires. L'exécution d'une tâche consiste à transformer une donnée technique d'entrée en une donnée technique de sortie sous certaines conditions. Les données techniques sont considérées comme versionnées afin de prendre en compte la dynamique temporelle de la définition des outils.

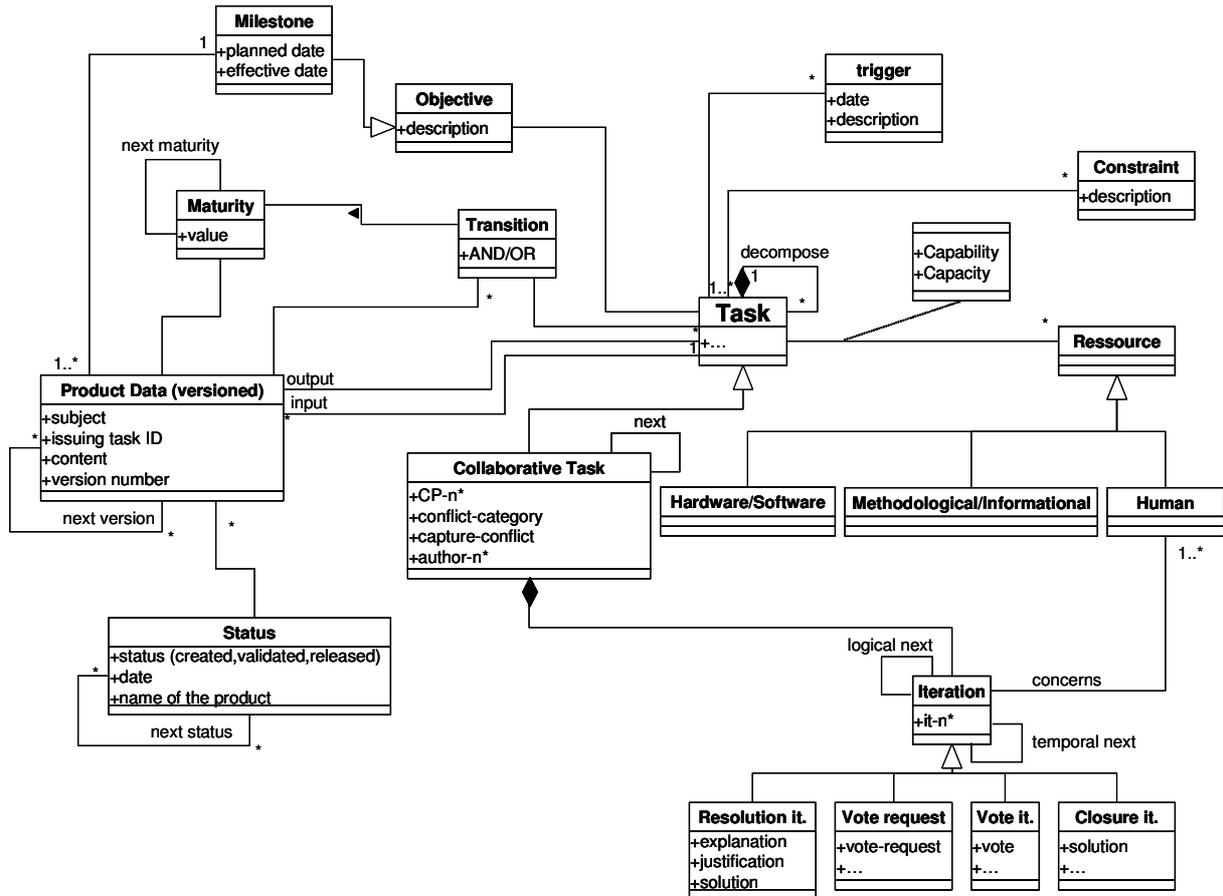


Figure 20 : Modèle processus d'IPPOP [Bettaieb, 06].

Modèle produit

Le modèle produit IPPOP est une extension du modèle « composants-lien-relation » issu de CODEMO [Roucoules et Tichkiewitch, 2000]. L'usage du modèle produit IPPOP est adapté au partage d'informations en conceptions innovantes ou nouvelles pour l'entreprise où la structure du produit n'est *a priori* pas déterminée à l'origine du projet.

Le modèle produit IPPOP permet de représenter le produit à l'aide de quatre entités de base :

- composant,
- interface,
- fonction,
- comportement.

Chaque entité peut prendre le qualificatif :

- « alternative » afin de permettre d'envisager la description de familles de produit,
- « commun » si l'entité est partagée par l'ensemble des acteurs de la conception,
- « vue » pour différencier les entités communes de celles spécifiques à un métier.

Ce modèle s'inspire fortement du modèle FBS puisqu'on retrouve les entités fonction, comportement et structure. Cette dernière étant obtenue en fusionnant le composant et l'interface. La distinction entre composant et interface permet de mettre en évidence au niveau du produit, ce qui relève du travail de conception. Le composant possède des interfaces non reliées à des fonctions et donc non présentes dans le modèle afin « d'habiller » le composant.

Le modèle PPO a également fait l'objet du développement d'un prototype logiciel (voir figure 21) afin de démontrer la pertinence de la conduite de la conception.

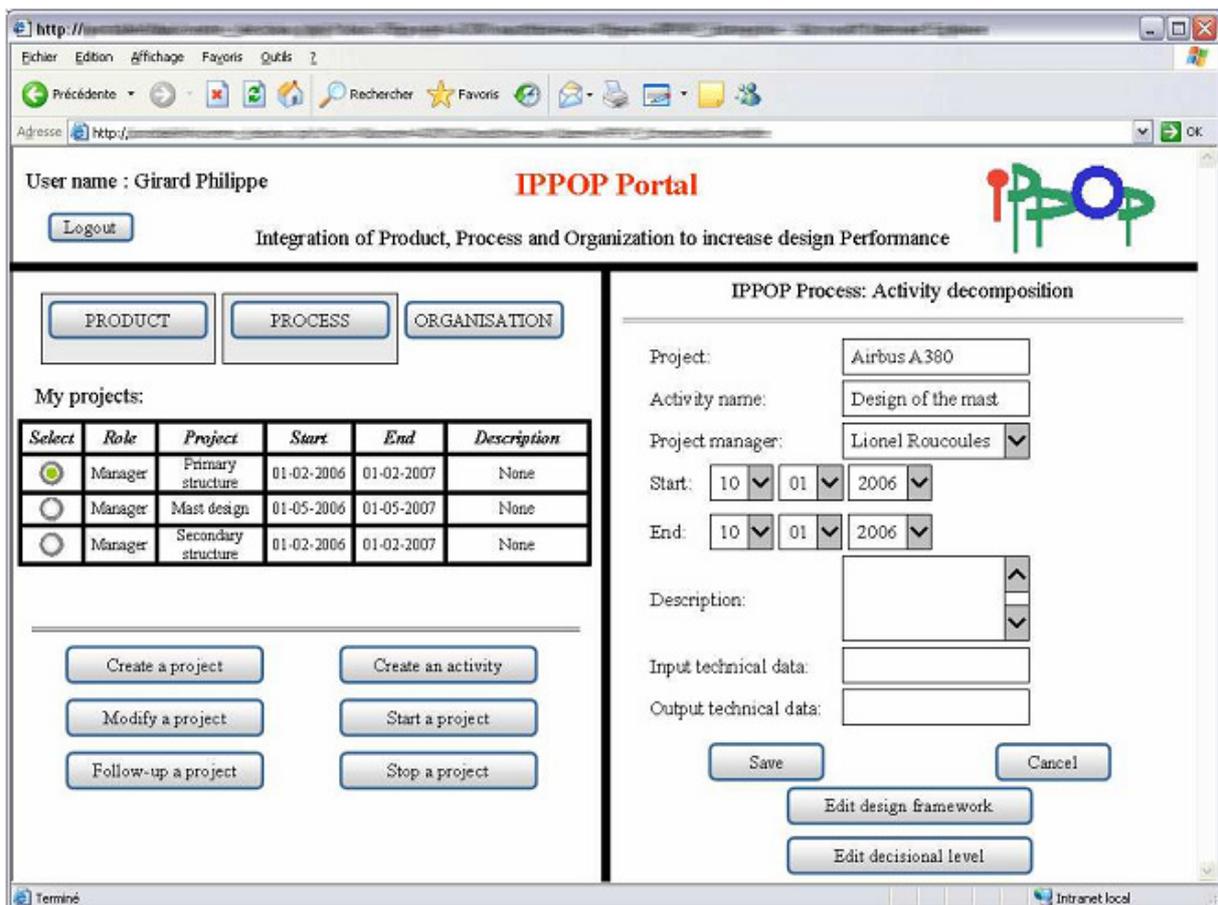


Figure 21 : Interface du portail IPPOP : extrait de [Merlo, 09].

2.3.3 Synthèse

En insistant sur la distinction entre les notions de fonction, de comportement et de structure, Labrousse fait remarquer que celles-ci peuvent apparaître comme délicates [Labrousse, 04]. Ces trois notions ne peuvent pas être totalement découplées puisqu'une fonction est une abstraction d'un comportement réalisé par l'homme. Donc, par essence, un comportement peut être directement associé, subjectivement, à une fonction. Les notions de fonctions, de comportement et de structure finissent par correspondre aux différentes phases

du cycle de conception c'est-à-dire qu'on passe d'un niveau conceptuel avec les fonctions jusqu'à un niveau de détail du produit suffisant pour décrire sa physique ou sa structure. On retrouve cette démarche avec l'analyse fonctionnelle en définissant des fonctions à satisfaire et, après une série de décomposition de plus en plus poussée, on obtient des solutions techniques. En ce sens, le modèle FBS-PPRE est une approche « globale » de modélisation en adéquation avec notre problématique.

Le modèle PPO intègre des travaux sur diverses modélisations. Les premiers développements de démonstrateurs ont montré la faisabilité et la valeur ajoutée du modèle. A travers le projet IPPOP, le modèle générique des connaissances a évolué pour s'intégrer avec un ensemble de travaux portant sur la modélisation du produit et du processus en vue de conduire efficacement le système de conception. Les évolutions portant sur la dimension conduite du modèle générique, ré-intitulée « organisation », ont été limitées et concernent essentiellement la nature des liens existant avec les dimensions produit et processus. Le modèle global qui a été développé par Robin et Girard [Robin et Girard, 06] regroupe des éléments propres aux modèles de produit, de processus et d'organisation [Merlo, 09].

Le modèle PPO servira, en partie, de support à nos propositions. Seul le modèle processus de conception n'a pas été retenu car il n'est pas suffisamment explicite vis-à-vis de notre démarche. Les réseaux GRAI R&D s'avèrent plus appropriés pour illustrer nos propos.

2.4 Conclusion

L'évolution de la modélisation permettant la conception collaborative s'oriente vers une modélisation de plus en plus globale. Alors que jusqu'au années 90 seul le produit était au centre de toutes les attentions, le processus de conception est aujourd'hui également pris en compte pour améliorer la performance de la conception. Le produit et le processus ont fait l'objet d'un certain nombre de modélisation mais les ressources n'étaient pas gérées. En intégrant également la gestion des ressources, les modèles obtenus se rapprochent d'une modélisation globale du système de conception. Dans ce mémoire, le modèle FBS-PPRE et le modèle PPO ont été présentés.

L'intérêt du modèle PPO repose donc sur sa vision globale du projet en intégrant les aspects produit, processus et organisation. Le Tableau 1 réalisé par Labrousse [Labrousse, 04] permet de comparer les différents modèles rencontrés dans la littérature dont le modèle FBS-PPRE et GRAI. Le modèle PPO n'y est pas représenté puisque plus récent que ces travaux mais il apporte les mêmes éléments que le modèle GRAI. Ce dernier est un des plus complets vis-à-vis des aspects retenus par l'auteur. Les seuls manques imputables au modèle GRAI font références aux effets externes (nommés dans le tableau « contraintes »). En effet, si le modèle PPO prend bien en compte ces effets, ils ne les simulent pas par un modèle.

Par rapport au modèle FBS-PPRE, dans le modèle PPO, les ressources sont gérées par les modèles processus et organisation, alors que les effets externes sont pris en compte dans le modèle organisation au travers des « informations externes ». Le comportement du processus n'est pas implicitement présent mais il est traité au travers des déclencheurs. Ils permettent de gérer l'aspect temporel du processus de conception ce qui permet d'obtenir une relative dynamique.

		IDEF0	IDEF3	SAGEP	GRAI	PATTERN	FBS	MOKA	HARANI	FBS-PPRE
Processus	Fonction	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Oui
	Comportement	Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Partiel ⁵⁰	Oui
	Structure Gestion temporalité	Oui Non	Oui Oui	Oui Non	Oui Oui	Oui Oui	Non Non	Oui Oui	Oui Oui	Oui Oui
Produit	Lien process/produit	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
	Fonction	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
	Comportement	Non	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui	Oui
	Structure	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Ressource	Lien process/ressource	Oui	Oui	Partiel ⁵¹	Oui	Oui	Non	Oui	Partiel ⁵²	Oui
	Fonction	Non	Non	Non explicité	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
	Comportement	Non	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Partiel ⁵³	Oui
	Structure	Non	Non	Non explicité	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui
Contrainte	Lien process/contrainte	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui
	Fonction	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
	Comportement	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
	Structure	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui

Tableau 1 : Comparaison entre le modèle FBS-PPRE et les modèles usuels de la littérature (jusqu'en 2004) [Labrousse, 04].

La structuration des données manipulées en conception collaborative a subi d'importantes évolutions au cours de ces trois dernières décennies. Historiquement centrée sur le produit, elle a commencé à prendre en compte le processus de conception afin d'évaluer également l'évolution des connaissances sur le produit au cours du cycle de conception. Les derniers aspects récemment intégrés au produit et au processus de conception prennent en compte la planification et la gestion des ressources de l'entreprise. Pour pouvoir mettre en place les mécanismes de transferts de spécifications projet, il est nécessaire de s'appuyer sur un environnement PPO structurant les données projet. Afin de décrire le déploiement de spécifications projet, nous avons retenu un environnement de conception collaborative composé de la structure GRAI R&D, des modèles processus GRAI et GRAI R&D ainsi que du modèle produit issu du projet IPPOP.

Chapitre 3 Description de l'environnement PPO support à la traçabilité des données d'un projet

La performance globale de la conception ne dépend pas uniquement du résultat obtenu (i.e. le produit), elle dépend également directement de l'efficacité de la composition du groupe d'acteurs en charge de la conception. En prenant en compte les approches sociotechniques de la conception, il est possible, par exemple, de mesurer la performance de la qualité de la composition du groupe d'acteurs. La conception consiste donc aussi à composer, gérer, répartir et organiser les acteurs dans des contextes non déterministes et évolutifs [Gonçalves *et al.*, 07]. Il n'y a que depuis une dizaine d'années, que des travaux se sont focalisés sur le contrôle de l'activité de conception [Coastes *et al.*, 00]. Le modèle organisation présenté plus en détail dans ce chapitre est utilisé comme point de départ à la description de l'environnement support de notre démarche. Le but du modèle organisation est d'assurer la gestion de l'ensemble des projets de l'entreprise afin de satisfaire les spécifications globales c'est-à-dire les spécifications du produit mais également celles de l'entreprise. Des modèles organisation existent depuis des décennies dans le domaine de la productique mais peu dans le domaine de la conception.

Ce chapitre présente également les modèles processus et produit supports aux transferts de spécifications. Le modèle processus utilisé dans le système décisionnel s'appuie sur les réseaux GRAI alors que le modèle processus de conception est issu des réseaux GRAI R&D. Enfin le modèle produit décrit est celui mis en œuvre dans le projet IPPOP.

Quelques légères modifications seront apportées à ces modèles, notamment sur leurs formalismes graphiques afin qu'ils soient pleinement exploitables dans notre démarche. Ces modifications ont été rendues nécessaires car les modèles utilisés non jamais été implémentés dans une même structure. Ce regroupement aurait fait apparaître des lacunes que nous nous proposons modestement de combler car il ne s'agit pas, du point de vue de notre problématique, d'être force de proposition dans la modélisation en conception collaborative.

3.1 Modèle organisation

Le modèle GRAI R&D permet de modéliser l'organisation des projets de l'entreprise et plus particulièrement des projets de conception. GRAI R&D est un modèle issu du domaine de la productique (méthode GRAI [Doumeingts, 84]) et a été adapté aux besoins et spécificités de la conception. Reprenant les concepts de GRAI, il utilise l'aspect décisionnel comme vecteur d'intégration des différentes dimensions de la conduite de la conception. Il permet de gérer les différents projets de l'entreprise et constitue le système pilotant de l'activité de conception.

3.1.1 Modèle de référence

Pour étudier le système de conception, le modèle GRAI R&D [Girard, 99] fournit un cadre afin de le modéliser. Trois systèmes permettent alors sa description (voir figure 3 du chapitre 1) :

- le système technologique au sein duquel les données d'entrées sont transformées en données de sortie,
- le système décisionnel qui pilote la transformation qui a lieu dans le système technologique,
- le système informationnel qui relie le système décisionnel et le système technologique tout en permettant la liaison avec l'environnement.

Cette modélisation du système de conception repose sur plusieurs théories :

- la théorie des systèmes [Simon, 60], [Le Moigne, 77],
- la théorie des organisations [Mintzberg, 89],
- la théorie des systèmes hiérarchisés [Mesarovic *et al.*, 70].

3.1.1.1 Système technologique

Le système technologique (figure 22) décrit la transformation des besoins exprimés (généralement dans un cahier des charges) en la définition de produits et de leurs procédés d'élaboration. Pour fonctionner, un ensemble de ressources humaines, physiques et informationnelles (logiciels, savoir-faire, flux d'information) sont utilisées. Le système technologique est structuré en centres de conception dont la description est l'objet du paragraphe 3.1.3.2.

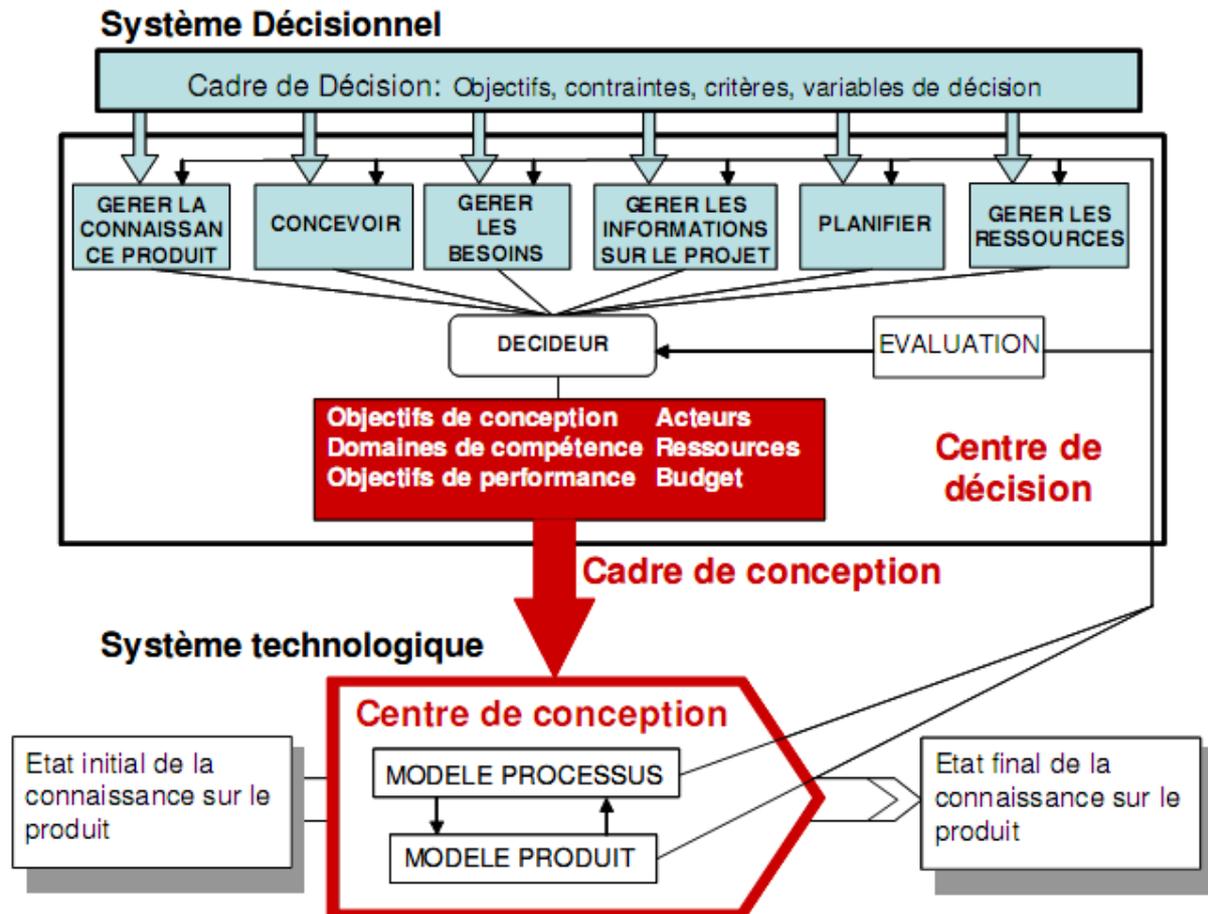


Figure 22 : Description locale du système de conception [Robin, 05].

3.1.1.2 Système décisionnel

Le système décisionnel décrit les décisions fixant les ordres de pilotage transmis au système technologique afin de coordonner et de synchroniser les activités s'y déroulant. Le système décisionnel est structuré en centres de décision dont la description est présentée dans le paragraphe 3.1.3.1. Un centre de conception est ainsi piloté par un centre de décision qui lui assigne un « cadre de conception ». Le système décisionnel reçoit du système technologique des informations de suivi (retour d'informations) concernant l'évolution des connaissances sur le produit dont il a la charge et concernant l'avancement et le résultat de ses activités.

3.1.1.3 Synthèse

Le modèle conceptuel de référence complet du système de conception (figure 23) permet, *a priori*, de prendre en compte l'ensemble des informations allant de l'entreprise jusqu'à la définition du produit.

Pour modéliser le système de conception, et en particulier l'aspect organisationnel, des formalismes de représentation existent et permettent d'exprimer, de façon rigoureuse et précise, les concepts du modèle GRAI R&D.

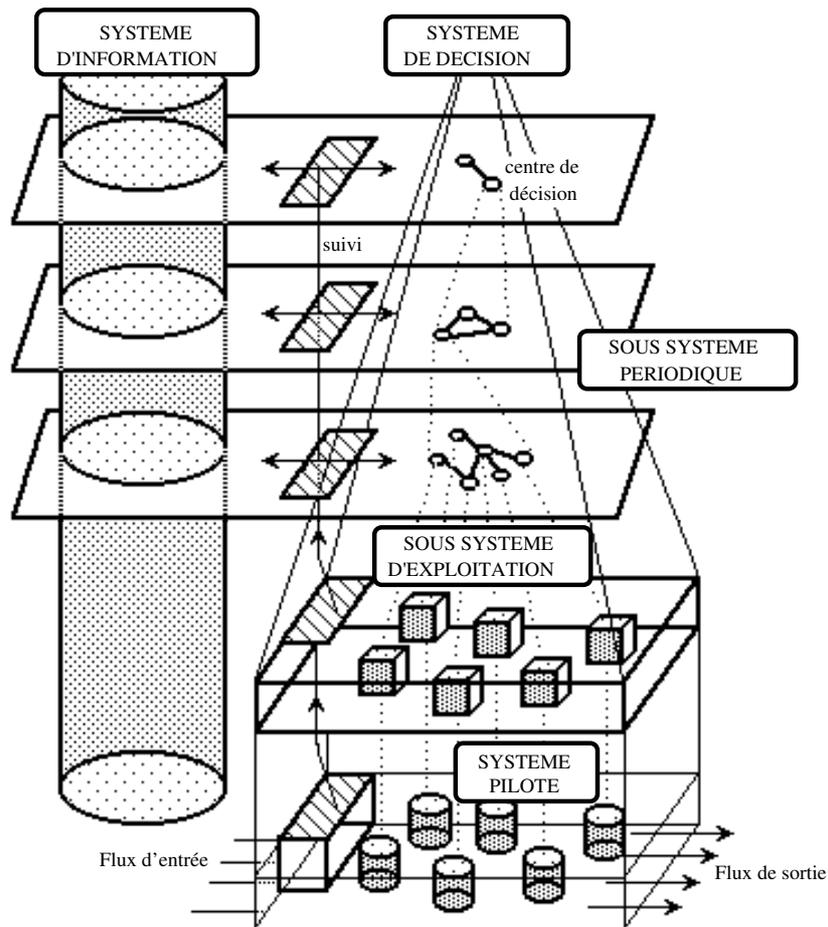


Figure 23 : Le modèle conceptuel de référence GRAI [Girard, 99].

3.1.2 Structure GRAI-R&D

La structure GRAI-R&D permet de **représenter le système décisionnel** du système de conception en prenant en compte la conduite dans le plan action et la conduite dans chaque plan objet [Girard *et al.*, 98]. La figure 24 illustre la vision multiprojet de l'entreprise prise en compte dans la structure GRAI R&D.

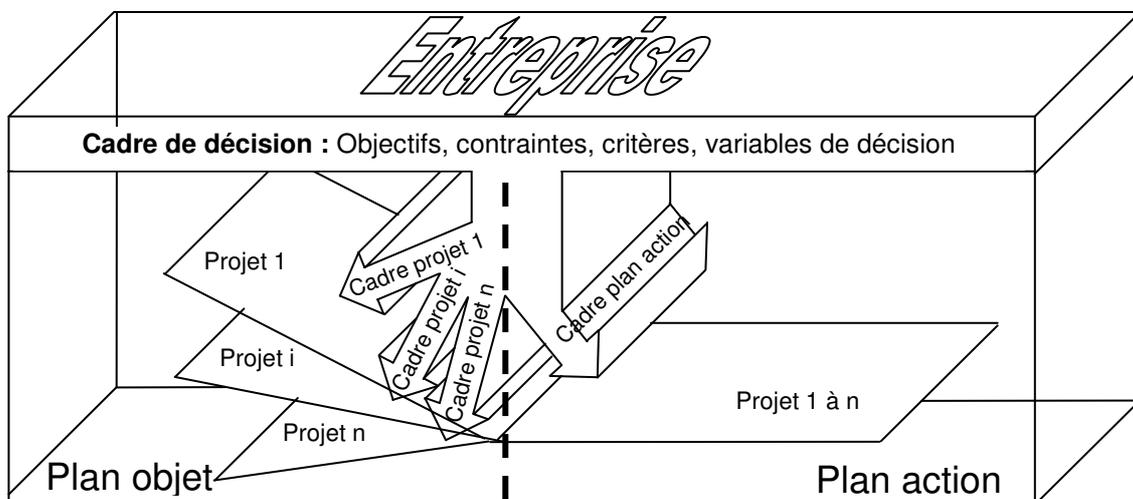


Figure 24 : Vision multiprojet de l'entreprise d'après la méthode GRAI [Gonçalves *et al.*, 09].

3.1.2.1 Plan action

Le plan action est assez proche du modèle de conduite utilisé dans le modèle GRAI pour les systèmes de production [Girard, 99]. En effet, le pilotage d'un système de production consiste, d'une part, à synchroniser dans le temps, niveau par niveau, la disponibilité des produits à transformer et celle des ressources nécessaires à cette transformation et, d'autre part, à coordonner les décisions entre chaque niveau hiérarchique. En conception, le produit n'existant pas au sens de la production (matière première, composant acheté,...) la transformation opérée dans le système technologique porte sur des informations. Ces dernières représentent l'état d'avancement de chaque projet et portent sur :

- la connaissance atteinte,
- le temps passé,
- les coûts dépensés,
- les moyens utilisés,
- etc.

Dans l'optique d'une gestion globale, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des projets en cours. La finalité des transformations réalisées au sein du plan action est de définir le ou les plans d'activités répondant aux exigences des objectifs de performances liés, d'une part, aux produits à concevoir et, d'autre part, à l'entreprise (coût, qualité, valeur, délais, flexibilité).

Les trois fonctions de base de la conduite dans le plan action sont [Girard, 99] :

- gérer les informations projets dans le temps,
- gérer les ressources dans le temps,
- planifier (synchroniser) les informations projets et les ressources dans le temps.

3.1.2.2 Plan objet

Le formalisme utilisé est inspiré de celui de la grille GRAI dont une description complète est faite dans le paragraphe 3.1.3. En effet, chaque plan est organisé comme une grille dont les colonnes représentent une décomposition selon le type d'objectif fonctionnel des décisions et dont les lignes représentent une décomposition selon la nature des décisions.

La nature des décisions est définie, dans la méthodologie GRAI, par le concept d'horizon - période [Doumeingts, 84]. L'horizon correspondant à la durée de validité de la prise de décision alors que la période permet de réactualiser les informations. Une première classification, en trois catégories, des décisions selon un critère d'ordre temporel peut être réalisée :

- les décisions à long terme ou stratégiques portent sur les politiques et les stratégies de l'entreprise : elles indiquent les orientations et les objectifs de la conception,
- les décisions à moyen terme ou tactiques portent sur l'organisation et les moyens que l'on va mettre en œuvre pour atteindre les objectifs,
- les décisions à court terme ou opérationnelles portent sur l'exécution des différentes activités.

Afin de mieux ordonner les décisions et de faciliter la compréhension du pilotage du système, une seconde classification est apportée par un critère correspondant à la nature même de la décision (i.e. son objectif fonctionnel). Trois types d'objectifs fonctionnels sont pris en compte :

- les décisions liées à la gestion des flux d'informations (i.e. des connaissances),
- les décisions liées à la gestion des capacités (i.e. des besoins),
- les décisions de synchronisation entre les flux et les capacités (i.e. entre les connaissances et les besoins).

3.1.3 Entités de la grille GRAI R&D

3.1.3.1 Centres de décision

Un centre de décision peut être défini comme étant le lieu d'une prise de décision à un niveau décisionnel donné (horizon – période) pour un objectif fonctionnel donné. Dans une grille GRAI R&D cela correspond à une case de la grille.

A chaque niveau décisionnel, au moins six centres de décision peuvent être identifiés en fonction de la décomposition des objectifs fonctionnels des décisions. Trois se situant dans le plan action et au moins trois dans le plan objet. La figure 25 [Girard et Doumeingts, 04] illustre cette décomposition dont les fonctions ont été définies dans les deux paragraphes précédents :

- gérer les connaissances sur le produit,
- synchroniser les méthodes de conception,
- gérer les besoins,
- gérer les informations sur les projets,
- synchroniser les projets de conception,
- gérer les ressources.

D'autres fonctions peuvent être rajoutées selon leur influence sur les prises de décision dans le pilotage des flux physiques (Gérer la qualité, Gérer la maintenance,...).

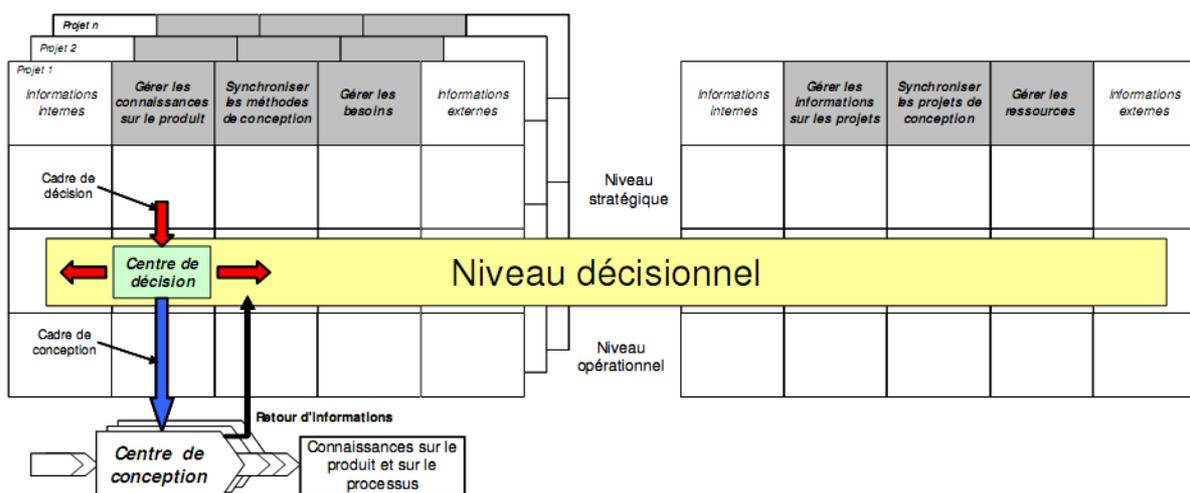


Figure 25 : La structure GRAI R&D [Girard et Doumeingts, 04].

3.1.3.2 Centres de conception

Il existe une très forte relation entre l'organisation du système technologique et les niveaux décisionnels [Girard, 99]. En effet, chaque niveau coordonne une partie plus ou moins importante du système technologique, appelée **centre de conception** dans le modèle GRAI R&D. La coordination entre les systèmes s'appuie sur les prises de décision [Duffy *et al.*, 97] basées sur des informations qui permettent de modéliser, de façon prédictive, le système sur lequel porte les décisions, et d'estimer la « valeur » résultante attendue. Cette valeur est définie selon un point de vue externe pour la satisfaction du client (coût et qualité du résultat de conception), et selon un point de vue interne pour la performance de l'entreprise (coût et qualité de la transformation vis-à-vis du système industriel). Afin de permettre les prises de décision il est nécessaire d'évaluer la performance en conception [O'Donnell et Duffy, 01] [Haffey et Duffy, 01].

Un centre de conception peut être considéré comme une organisation particulière mise en place afin d'atteindre certains objectifs de conception. Le centre de conception est le lieu de la transformation de l'état initial de la connaissance sur le produit à son état final. Ce type de transformation peut être représenté au travers d'un modèle de processus de conception alors que la connaissance sur le produit est, quant à elle, intégrée dans un modèle produit [Eynard, 99].

L'état final est obtenu lorsque tous les objectifs assignés au centre de conception sont atteints. Le contexte au sein duquel la transformation a lieu est décrit à l'aide du **cadre de conception**.

Un centre de conception est piloté par un seul centre de décision de planification, alors qu'un centre de décision de planification peut piloter plusieurs centres de conception. Ainsi, il est possible de planifier le déclenchement des activités des centres de conception à chaque niveau de centre de décision. L'autonomie de chaque centre de conception assure la simultanéité dans le processus alors que le pilotage par un centre de décision de planification, qui fixe le cadre des centres de conception qu'il pilote, assure la concourance.

3.1.3.3 Cadres de décision

Les différentes activités au sein d'un centre de décision [Doumeingts *et al.*, 96] sont définies par le biais du **cadre de décision** qui leur est associé (variables et limites de la prise de décision), du résultat de chaque processus de prise de décision, et par les informations utilisées pour prendre la décision. Le concept de cadre de décision permet la coordination entre les centres de décision. Un cadre de décision est défini par :

- les objectifs de la prise de décision,
- les variables de décision qui permettent de déterminer les actions à mener,
- une ou plusieurs contraintes en relation avec les variables de décisions,
- un ou plusieurs critères permettant un choix entre les variables de décision.

3.1.3.4 Cadres de conception

Provenant d'un niveau décisionnel supérieur qui coordonne le centre de conception considéré, un cadre de conception est caractérisé par :

- des objectifs de conception qui doivent être atteints par le centre de conception,

-
- un champ de compétences qui détermine les connaissances, les méthodes, les procédures et les technologies qui doivent être utilisées,
 - des objectifs de performance pour évaluer périodiquement les activités et leurs résultats, comme par exemple des jalons et des valeurs attendues,
 - des moyens requis pour atteindre les objectifs : humains (concepteurs) et ressources matériels, budget, délais, etc.

Les éléments du cadre de conception sont représentatifs de l'osmose d'une décision de planification (notion de capacité : affectation de ressources) et d'une décision de conception (notion de résolution : réduction de l'incomplétude par la satisfaction d'objectifs de conception). Dans le cas où les problèmes identifiés seraient communs à plusieurs projets, il peut être décidé de les résoudre au sein de la même organisation afin d'optimiser les ressources [Girard, 99].

Les concepteurs sont des ressources humaines assignées à un centre de conception pour atteindre des objectifs assignés. Un centre de conception peut être composé d'un groupe de projet, d'une équipe de développement ou d'une personne seule.

3.1.4 Synthèse

Les grilles GRAI R&D permettent d'illustrer les concepts du modèle GRAI R&D. Une grille GRAI R&D représente un tableau dont l'intersection entre une ligne et une colonne représente un centre de décision.

Les flux d'informations sont représentés dans une grille GRAI R&D par une flèche dont l'origine est un centre de décision émetteur ou une entité externe ou interne, et l'extrémité est un centre de décision destinataire ou récepteur. Les grilles GRAI R&D illustrent deux types de liens :

- le lien décisionnel ou cadre de décision,
- le lien informationnel.

Un lien décisionnel (i.e. un cadre de décision) correspond à l'ensemble des informations nécessaires à la prise de décision d'un centre de décision récepteur, fournies par un centre de décision émetteur. Un cadre de décision est représenté sur la grille par une flèche pleine (voir figure 26).

Un lien informationnel correspond à un ensemble de données fournies à un centre de décision par un autre centre de décision, par le système piloté ou par l'environnement. Le lien informationnel est représenté sur la grille par une flèche simple (voir figure 26).

Les informations externes et internes sont représentées par deux colonnes. Elles permettent de tenir compte des interfaces informationnelles avec l'environnement du système et avec le système piloté, en l'occurrence, le système technologique.

Les concepts manipulés au niveau de la grille sont les suivants :

- les fonctions,
- les niveaux décisionnels (couples Horizon/Période),
- les centres de décision et leur structure,
- les flux d'informations (cadre de décision et lien informationnel),
- les informations internes et externes.

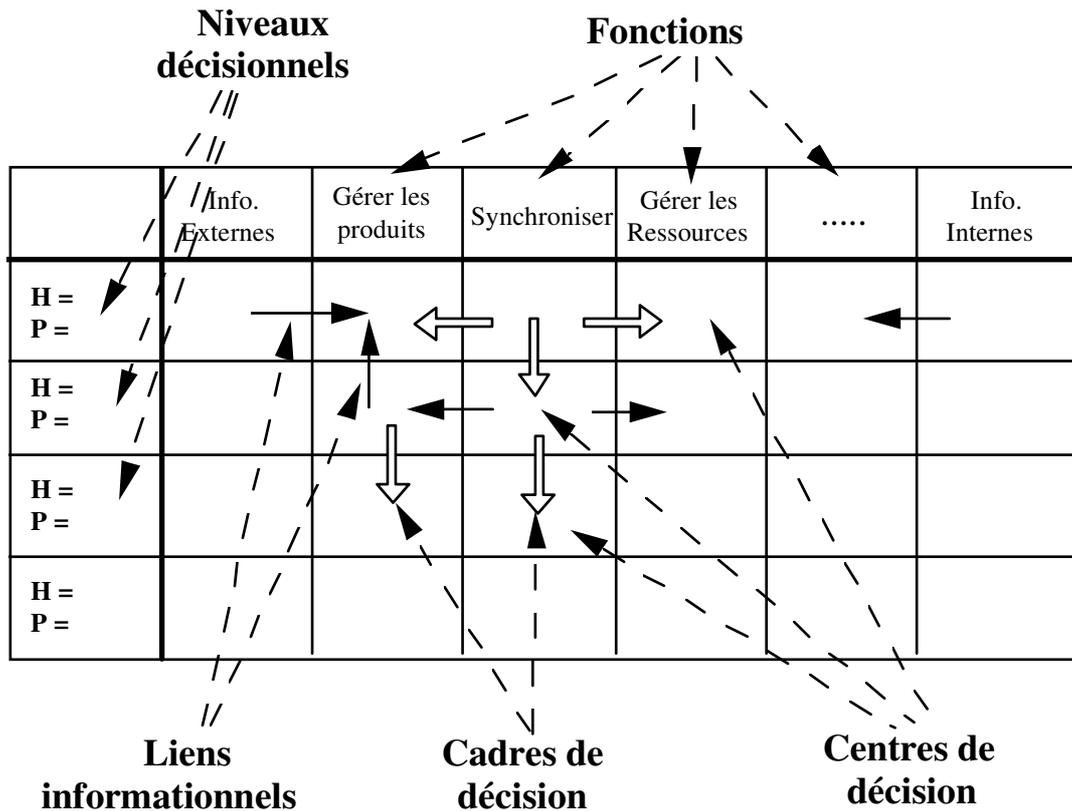


Figure 26 : La grille GRAI [Girard, 99].

Sur cette grille, les centres de décision se définissent conceptuellement comme étant à l'intersection d'une fonction et d'un niveau décisionnel. Ils regroupent exclusivement les activités appartenant à la même fonction et au même niveau décisionnel. Leur structure (i.e. leur processus de décision) peut être détaillée en utilisant les réseaux GRAI.

Pour remplir une grille GRAI R&D, il faut alors aller dans l'entreprise, procéder à des interviews et déterminer comment les informations circulent entre les services. Ce travail peut s'avérer plus ou moins long en fonction de l'organisation même de l'entreprise et de son étendue.

3.2 Modèles processus

La modélisation d'un processus a pour objectif de décrire l'ensemble des informations permettant l'évolution d'un système. Dans le modèle PPO issue d'IPPOP, deux systèmes existent : le système décisionnel et le système technologique. Ces systèmes peuvent utiliser chacun un modèle processus pour les caractériser.

3.2.1 Deux modèles processus

Les éléments d'entrée et de sortie de transformations opérées dans les systèmes décisionnel et technologique sont différents. Un même modèle permettrait de les prendre en compte. Or, nous avons décidé de les distinguer en retenant deux modèles processus distincts. Les raisons de ce choix seront expliquées dans les prochains paragraphes.

3.2.1.1 Modèle processus de décision

Les processus de décision ayant lieu dans le système décisionnel peuvent être modélisés par l'intermédiaire des réseaux GRAI [Marcotte, 95]. Ces réseaux permettent de représenter les activités permettant le pilotage du système technologique. Ce choix s'impose par le fait que ce modèle est déjà bien intégré à la structure GRAI R&D présenté dans le paragraphe 3.1.2.

Les transformations opérées dans le système décisionnel et formalisées graphiquement par les grilles GRAI R&D permettent de générer des cadres de décision et de conception à partir d'un cadre de décision et d'informations sur le produit et l'état d'avancement du projet. En effet, un centre de conception reçoit un cadre de décision d'un centre émetteur et doit fournir un ou plusieurs cadres de décisions à respectivement un ou plusieurs centres destinataires. De plus un centre de décision doit également fournir un cadre de conception au centre de conception qu'il pilote.

En formalisant le transfert des informations et des cadres (de conception et de décision), la traçabilité des données techniques mais également organisationnelles (délais, ressources utilisées, etc.) peut être assurée. Par exemple, l'ensemble des cadres de décision envoyé à des centres de décision situés à un niveau opérationnel est conforme au cadre de décision plus global reçu par les centres situés à un niveau tactique puis stratégique.

Pour mettre en place cette modélisation, dont l'objectif principal est l'amélioration (et/ou la conception) du système étudié, une démarche structurée est proposée dans la méthode GRAI : GRAI Integrated Method (GIM) [Zanettin, 94].

3.2.1.2 Modélisation des activités d'ingénierie

L'objet de la conception, à savoir le produit, évolue tout au long du cycle de conception et cette évolution est influencée par les activités du processus de conception. Ces activités sont tout aussi importantes à gérer que le produit à concevoir car elles peuvent avoir des effets sur sa définition. Le modèle processus doit formaliser les activités de la conception, leurs enchaînements et tous les paramètres spécifiques aux activités (des objectifs et des ressources par exemple). Ces activités sont pilotées par le processus de décision par l'envoi de cadres de conception. Ainsi, il est possible *a priori* de connaître et maîtriser les éléments qui agissent sur la transformation de la connaissance du produit (i.e. le passage de l'état initial à l'état final).

Un processus de conception doit regrouper l'ensemble des activités nécessaires à la résolution d'un problème de conception pouvant correspondre à un projet, un sous-projet ou un problème plus élémentaire.

Les réseaux GRAI R&D ont été retenus dans l'environnement PPO servant de support à notre démarche. Ce choix a été fait pour les raisons suivantes :

- conserver une relative homogénéité dans les modèles : les réseaux GRAI sont utilisés pour modéliser les activités de décision,
- conserver la sémantique de la méthodologie GRAI pour représenter les activités en conception : le modèle processus de conception utilisé lors du consortium IPPOP est moins facile à exploiter dans le cadre de notre démarche.

3.2.2 Activités des modèles processus

Les réseaux GRAI et GRAI R&D représentent des types d'activités qui sont, en partie, communs aux deux modèles. Une activité correspond à une transformation, d'un état initial en un état final, possédant un ou plusieurs déclencheurs et utilisant des supports d'information (données utilisées par l'activité, ressources qui supportent le traitement de l'activité). Les réseaux GRAI utilisent deux types d'activités que sont l'activité de décision et d'exécution alors que les réseaux GRAI R&D utilisent, en plus de ces deux types d'activités, l'activité de conception.

3.2.2.1 Activité de décision

L'activité de décision (figure 27) est une activité humaine, non automatisable qui permet pour plusieurs données d'entrée (propositions) de n'en retenir qu'une ou quelques-unes [Eynard, 99]. Le caractère non automatisable peut être atténué par la mise en œuvre de systèmes d'Intelligence Artificielle ou basés sur des heuristiques.

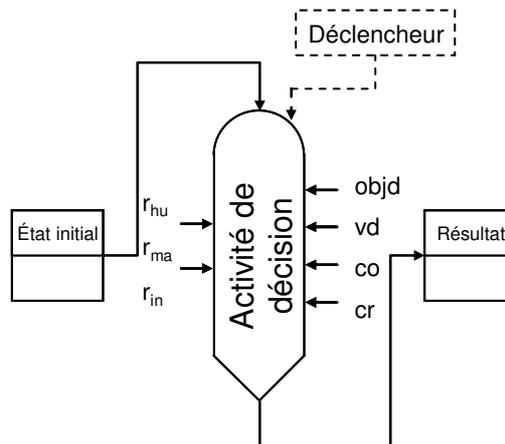


Figure 27 : Activité de décision [Eynard, 99].

Dans le système décisionnel, elle participe à l'activité de conduite c'est-à-dire au pilotage d'un autre système. Par exemple, cette activité permet de déterminer et de retenir les cadres qui vont être envoyés aux centres de décision et aux centres de conception.

Dans le système technologique, elle correspond à des sélections d'alternative de solutions pour résoudre un problème de conception. Les choix effectués n'affectent pas les ressources du système et ne nécessitent pas de modification de l'ordonnancement des activités du processus de conception. Ces décisions de conception, locales, n'ont pas de conséquences sur l'organisation qui en a la charge. Par organisation, on entend ici l'ensemble des ressources humaines et matérielles concernées par l'activité.

L'activité de décision (figure 27) est caractérisée par :

- l'information traitée et transformée par l'activité. Celle-ci est représentée par un état initial et un état final aussi appelé résultat,
- des supports de l'activité c'est-à-dire des ressources humaines, matérielles et informationnelles,
- des supports spécifiques à l'activité c'est-à-dire des objectifs, des variables de décision, des contraintes et des critères. Ces supports renvoient directement aux

cadres de décision dans le système décisionnel et aux cadres de conception dans le système technologique.

Dans un processus de conception, cette activité peut servir à évaluer et valider des résultats de conception obtenus en s'appuyant sur des objectifs, des contraintes, des ressources, etc. Le Tableau 2 caractérise un exemple d'informations nécessaires à une activité de décision.

Intitulé	x_{de5}	« Valider l'architecture Turbine »
Etat initial	q_{e4}	$ep_{4,4}$: état de connaissance du produit de niveau 4 de décomposition associé à l'état q_{e4} où en plus d'un niveau de détail plus fin les caractéristiques des composants sont clairement spécifiées if_4 : ensemble d'informations associé à l'état q_{e4} (schémas, indicateurs de performances techniques, etc.) t_4 : date d'occurrence de l'état q_{e4}
Supports	x_{de7}	obj_{de5} : - « Garantir faisabilité technico-économique, etc. » vd_{e5} : - « Temps de développement » - « Coût d'industrialisation, etc. » co_{e5} : - « Utiliser seulement des moyens de fabrication internes » cr_{e5} : - « Limiter le cout d'industrialisation et/ou de sous-traitance »
		r_{hue5} : - « 1 expert de la dynamique d'arbre » r_{mae5} : - « matériel de visionnage » - « 1 local » r_{ine5} : - « Connaissances technologiques des responsables du projet »
Etat final	q_{e5}	$ep_{4,5}$: état de connaissance du produit de niveau 4 de décomposition associé à l'état q_{e5} if_5 : ensemble d'informations associé à l'état q_{e5} (notice d'agrément de la solution justifiant la validation, effectuée) t_5 : date d'occurrence de l'état q_{e5}

Tableau 2 : Caractérisation d'une activité de décision.

3.2.2.2 Activité d'exécution

L'activité d'exécution (figure 28) permet la transformation d'une donnée d'entrée en une donnée de sortie. Cette transformation est connue, procédurale et parfois même automatisable. En règle générale, on connaît *a priori* le temps nécessaire à son déroulement ainsi que les ressources utilisées. Comme toutes les autres activités, elle peut être déclenchée à un instant donné ou, lorsque les conditions nécessaires à son déclenchement sont requises (informations d'entrée connues, ressources disponibles, ...).

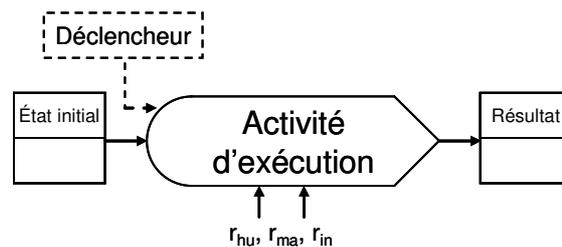


Figure 28 : Activité d'exécution.

Dans le système technologique, ce type d'activité renvoie typiquement à des activités de calculs informatiques (simulation de déformation sous charge, de dilatation thermique, de trajectoires d'usinage, ...).

L'activité d'exécution (figure 28) est caractérisée par :

- l'information traitée et transformée par l'activité. Celle-ci est représentée par un état initial et un état final aussi appelé résultat,
- des supports de l'activité c'est-à-dire des ressources humaines, matérielles et informationnelles.

L'activité d'exécution peut servir, dans un processus de conception, à lancer une procédure, un calcul, ..., par l'intermédiaire de ressources humaines, logiciels, etc. Le Tableau 3 caractérise un exemple d'informations nécessaires à ce type d'activité.

Intitulé	a _{ee3}	« Étudier le produit : décrire les entités »
Etat initial	q _{e2}	ep _{2,2} : état de connaissance du produit de niveau 2 de décomposition associé à l'état q _{e2} où en plus d'un niveau de détail plus fin les caractéristiques des composants sont clairement spécifiées if ₂ : ensemble d'informations associé à l'état q _{e2} (schémas d'architecture, etc.) t ₂ : date d'occurrence de l'état q _{e2}
Supports		: - « 1 expert tolérancement géométrique » r _{hue3} : - « 1 expert thermomécanique » r _{mae3} : - « 2 postes informatiques » : - « 1 local » r _{ine3} : - « Logiciel de calcul de chaînes de cotes » : - « Logiciel de calcul élément finis »
Etat final	q _{e3}	ep _{3,3} : état de connaissance du produit de niveau 3 de décomposition associé à l'état q _{e3} if ₃ : ensemble d'informations associé à l'état q _{e3} (notices calculs, courbes, graphiques, etc.) t ₃ : date d'occurrence de l'état q _{e3}

Tableau 3 : Caractérisation d'une activité d'exécution.

3.2.2.3 Activité de conception

L'activité de conception (figure 29) est spécifique aux réseaux GRAI R&D utilisés pour représenter le processus de conception dans le système technologique. Cette activité est humaine, pas ou peu automatisable, et permet de transformer une donnée d'entrée (état initial du modèle produit) en plusieurs données de sortie (alternatives de solutions) devant répondre aux objectifs et aux contraintes qui lui sont imposées.

L'activité de conception (figure 29) est caractérisée par :

- l'information traitée et transformée par l'activité. Celle-ci est représentée par un état initial et un état final aussi appelé résultat,
- des supports de l'activité c'est-à-dire des ressources humaines, matérielles et informationnelles,

- des supports spécifiques à l'activité c'est-à-dire des objectifs de conception et des contraintes de conception. Ces supports renvoient directement aux cadres de conception présentés dans le paragraphe 3.1.3.4.

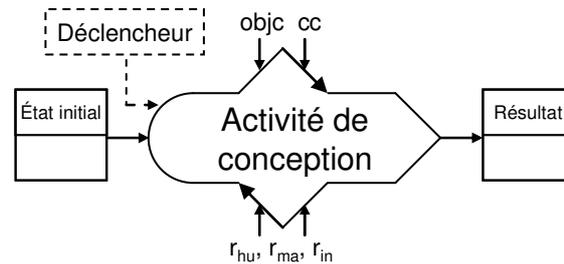


Figure 29 : Activité de conception.

3.2.3 Transformations sur les activités des modèles processus

Les activités élémentaires des modèles processus ayant été définies, leur utilisation peut être soumise à certaines transformations permettant l'obtention de processus complexes. Le comportement du processus permet alors de traduire son aspect dynamique. Ainsi, la représentation du comportement se traduit par la représentation :

- des déclenchements d'activités,
- de la logique de succession des activités,
- de la parallélisation des activités : en particulier pour un processus concourant,
- des itérations de conception.

Toutes les illustrations présentées dans les paragraphes suivant représenteront comme activité de base, l'activité de conception. Evidemment, les représentations symboliques peuvent s'appliquer à n'importe quel type d'activité.

3.2.3.1 Déclenchement d'une activité

Un déclencheur (voir figure 30) permet d'initialiser et de lancer une activité. Il permet également de prendre en compte le facteur temporel en permettant la synchronisation des activités.

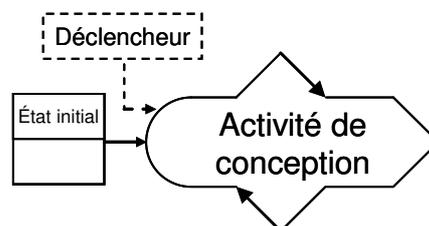


Figure 30 : Le déclencheur [Eynard, 99].

3.2.3.2 Succession des activités

Implicitement, lorsqu'une activité est représentée à la suite d'une autre, cette activité ne peut se lancer qu'une fois la première ayant terminé son déroulement (voir figure 31).

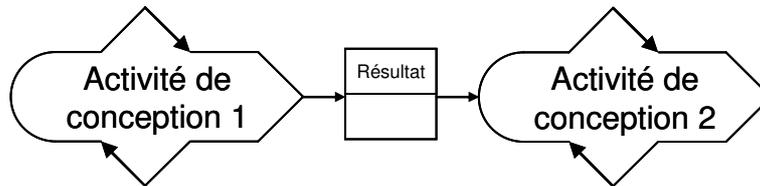


Figure 31 : Opérateur de série [Eynard, 99].

3.2.3.3 Opérations de divergence et de convergence en ET et en OU

La divergence en ET est représentée par une double barre verticale afin de représenter la mise en parallèle d'activités (voir figure 32 a).

La convergence en ET est également représentée par une double barre verticale. Ceci afin de permettre le regroupement des résultats d'activités se déroulant en parallèle (voir figure 32 b). Cette convergence ne peut avoir lieu qu'une fois que chaque activité ait produit un résultat.

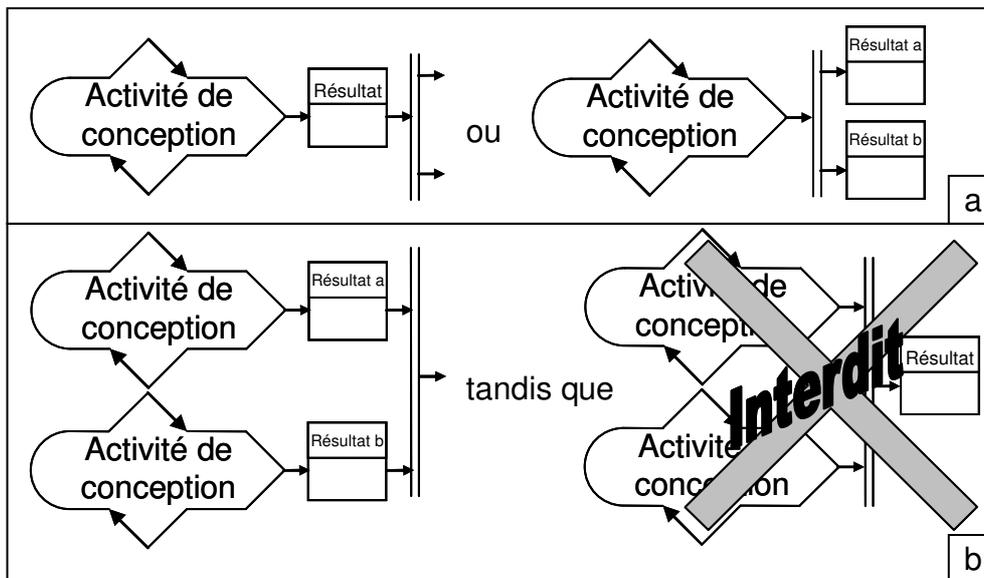


Figure 32 : Opérateurs divergence et convergence en ET [Eynard, 99].

La divergence en OU est décrite par une simple barre verticale représentant la possibilité de poursuivre au moins deux activités. Pour la précision du modèle, il est préférable d'insérer une activité de décision afin de définir le mode de choix devant être effectué (simple, exclusif, conditionné) comme illustré figure 33 a.

Enfin, la convergence en OU également décrite par une simple barre permet de rassembler les résultats possibles d'activités avant le lancement de l'activité suivante (voir figure 33 b). Tout comme la convergence en ET, cette opération ne peut avoir lieu qu'une fois que chaque activité ait produit un résultat.

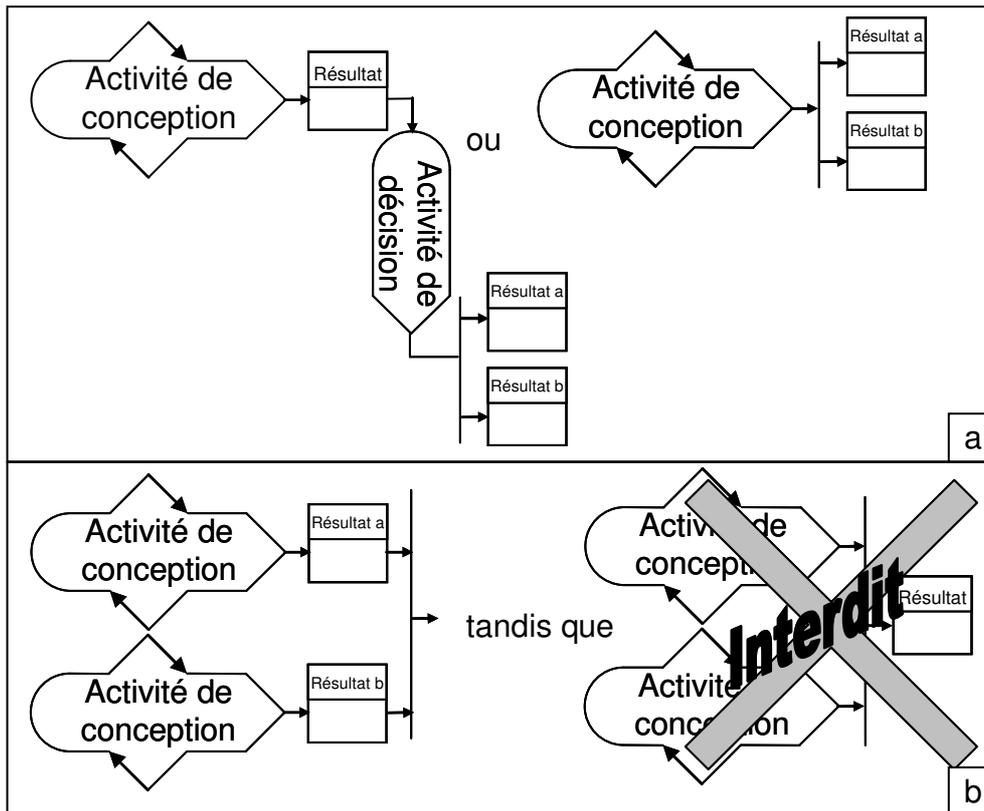


Figure 33 : Opérateurs divergence et convergence en OU [Eynard, 99].

3.2.3.4 Itération d'une activité

L'opérateur d'itération permet le bouclage d'une activité ou d'une séquence d'activité si celle-ci s'avère non satisfaisante. Le symbolisme retenu renvoie le résultat de l'activité comme un support pour l'activité et fait apparaître un déclencheur afin de relancer l'activité : voir figure 34. Il est rappelé que l'activité de conception possède par nature un caractère itératif (symbolisé par le formalisme graphique de l'activité).

Les symboles de communication permettant de signaler qu'un support d'informations utilisé dans un réseau provient d'un autre réseau sont représentés sous forme de losanges et mentionnent le code de l'activité et du réseau destinataire ou origine.

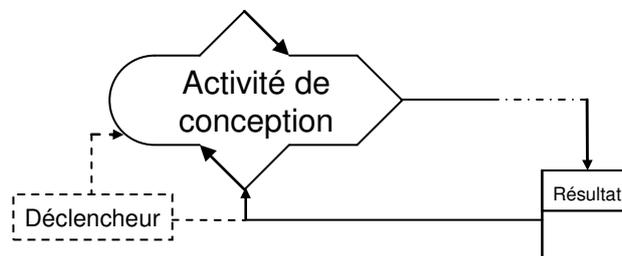


Figure 34 : Opérateurs d'itération [Eynard, 99].

3.2.3.5 Cas particulier de l'agrégation d'activités

Les réseaux GRAI et GRAI R&D ne prévoient pas de symbolisme pour l'agrégation d'activités qui ne sont pas du même type. Or, dans notre démarche, les processus pourront être présentés comme une activité complexe constituée des activités élémentaires décrites précédemment. Pour cette représentation particulière, nous utiliserons, par exemple pour un processus de conception, le formalisme de la figure 35. Cette activité est caractérisée par les informations, les supports d'activités et les supports spécifiques des activités qu'elle agrège.

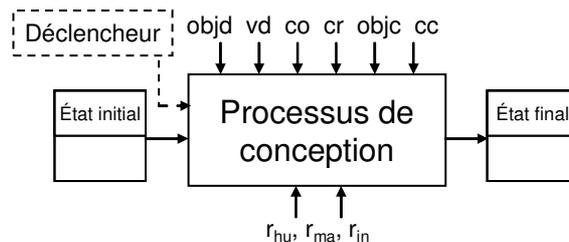


Figure 35 : Activité complexe : agrégation d'activités élémentaires.

3.2.4 Synthèse

La conception est un processus de transformation de flux d'informations qui représente l'évolution de la connaissance du produit. Des éléments viennent influencer ce processus et ne sont traditionnellement pas formalisés : par exemple, la stratégie d'entreprise, les contraintes du marché, les ressources de conception et de production, etc.

Ce modèle peut être appliqué au processus de conception que cette dernière soit innovante ou routinière. En effet, l'état initial est généralement connu puisqu'il correspond à l'expression validée des besoins de l'utilisateur (souvent sous forme de cahier des charges fonctionnel). L'action à réaliser est la résolution des problèmes identifiés pour satisfaire un ou plusieurs besoins. L'état final n'est *a priori* pas connu puisque cette connaissance est obtenue en opérant des choix entre des solutions possibles mises en évidence par le processus de conception. Une des complexités supplémentaires est que, bien souvent, le processus de conception se construit au fur et à mesure des choix opérés sauf dans le cas d'une conception routinière bien maîtrisée. En conception routinière, le processus sera constitué essentiellement d'activités d'exécution alors qu'en conception innovante il y aura beaucoup plus d'activités de conception et de décision qui sont, par nature, humaines c'est-à-dire pas ou peu automatisables. Dans le cadre de la conception, le processus ne se limite pas à une somme d'activités car, contrairement au domaine de la production, les activités sont *a priori* inconnues que cela soit du point de vue de leur nature ou de leur chronologie.

3.3 Modèle produit

La coopération entre les acteurs du cycle de conception est devenue, depuis plus d'une vingtaine d'années, un enjeu crucial. Les chercheurs et les industriels mettent en place des méthodes et des outils afin de faciliter cette coopération. L'objectif principal est de réduire les temps et les coûts de développement. La difficulté est, d'après Arzur [Arzur *et al.*, 00], de réussir à faire dialoguer les intervenants du processus de conception alors que leurs cultures sont très différentes et que le langage est spécifique à chaque métier.

Un langage commun de description du produit est donc indispensable aux acteurs de la conception pour leur permettre de stocker et de récupérer les données relatives au produit. Une base de données peut être utilisée [Tichkiewitch *et al.*, 95] afin de permettre aux intervenants de dialoguer et de stocker les informations même s'ils ne travaillent pas sur le même site. De plus, l'utilisation de ce type de base de données permet de conserver une trace de l'évolution de la description du produit (i.e. ses différents états) et d'effectuer des requêtes ne renvoyant que les données relatives à un domaine d'expertise.

Dans ce paragraphe, les entités de bases permettant de décrire un produit seront présentées. La notion de liens sera précisée afin d'établir les relations entre les descriptions fonctionnelles et structurelles du produit. Enfin des opérations telles que la décomposition et l'agrégation seront décrites. Ces opérations servent à détailler ou à synthétiser le modèle produit. La représentation graphique du modèle produit sera illustrée au travers de graphes orientés et ouverts.

En utilisant ce graphisme, il est possible de caractériser un diagramme de l'environnement, un FAST (Function Analysis System Technic) et un modèle cinématique [Dufaure, 05]. Cette caractérisation permet de montrer comment le modèle produit garantit le transfert de spécifications bien que les outils utilisés soient différents. Parmi les nombreux outils d'aide à la conception, seuls les trois cités précédemment seront présentés car ils permettent, pour notre problématique et dans notre démarche, de mettre en évidence la propagation des spécifications d'un point de vue technique.

3.3.1 Description du modèle produit

3.3.1.1 Entités de base

Dans le cadre de l'utilisation d'une base de données commune à l'ensemble des acteurs du cycle de conception, la structuration des informations est nécessaire. Pour ce faire, le modèle produit présenté est constitué de quatre entités de base. Ce modèle produit fait suite à des travaux concernant le lien entre la description structurelle et fonctionnelle du produit [Constant, 96] [Eynard *et al.*, 97]. Plusieurs types de représentation existent pour décrire ces liens. Le modèle produit retenu utilise, pour décrire le produit, les entités de base suivantes:

- le composant,
- l'interface,
- la fonction,
- le comportement.

Ces quatre entités de base du modèle sont reliées entre elles. La représentation proposée par Dufaure [Dufaure, 05] (figure 36) ne fait pas apparaître l'entité comportement mais celle-ci est bien présente dans le modèle produit issu d'IPPOP.

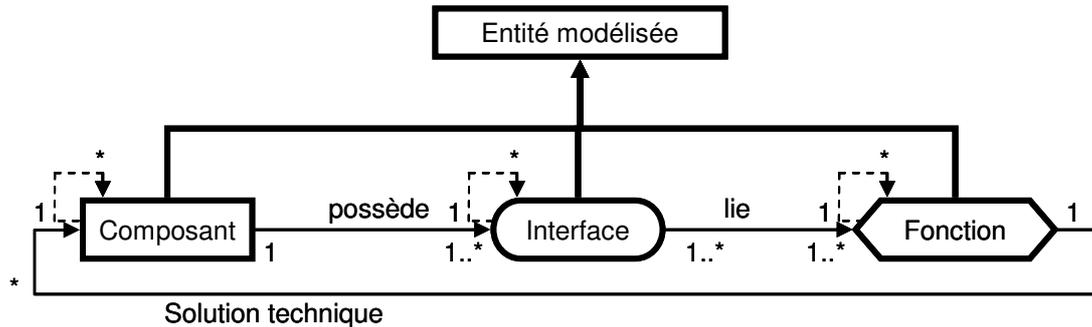


Figure 36 : Représentation UML (Unified Modeling Language) du modèle produit, d'après [Dufaure, 05].

Parmi les intérêts de ce modèle produit on peut citer :

- sa capacité à décrire le produit durant tout le cycle de conception (i.e. de la phase de conception préliminaire à la phase de conception détaillée).
- sa prise en compte de tous les points de vue couvrant ainsi l'ensemble des expertises métier.

La structuration du modèle ayant été présentée, les paragraphes suivants décrivent la sémantique et la taxonomie des entités.

Le composant permet la représentation structurelle du produit. Il peut être le produit dans sa totalité ou une partition du produit (i.e. un assemblage, un sous-assemblage, une pièce).

L'interface fait le lien entre un composant et le milieu extérieur. Elle peut être un élément géométrique (surfacique, linéique ou ponctuel) mais peut par exemple également représenter le maillage associé à un composant. L'interface est l'entité qui permet d'accéder au composant et ce, avec une vision spécifique.

La fonction désigne un objectif que le produit devra atteindre. Dans le modèle produit, la fonction met en relation des composants via leurs interfaces. Elle peut être exprimée par un verbe à l'infinitif suivi d'un complément (d'après l'analyse fonctionnelle [NF X 50-151, 91]). Chaque fonction doit être définie par un critère d'appréciation. Ce critère est un paramètre retenu afin d'apprécier la manière dont la fonction sera remplie ou dont une contrainte sera respectée.

Le comportement représente les états modaux du produit [Yesilbas *et al.*, 06]. Il permet la traduction et la présentation du comportement du produit, c'est-à-dire son état à un instant donné sous certaines conditions spécifiques [Chandrasekaran et Josephson, 00]. D'après Gero [Gero, 90], il peut également être vu comme un lien entre les fonctions et les composants.

3.3.1.2 Attributs des entités de base

La description des entités définies précédemment peut être affinée en ajoutant un des qualificatifs suivants : alternative, commune et vue. Une entité qualifiée de « commune » est une entité dont la description est la même pour tous les intervenants du cycle de conception.

Une entité qualifiée d' « alternative » apparaît lorsqu'il existe un choix. C'est-à-dire que cette entité est, soit optionnelle, soit à choisir parmi plusieurs autres entités (sous-entendu issue de la même entité de base).

Par opposition aux entités « communes », une entité « vue » est une entité dont la description est spécifique à certaines expertises et parfois même à une seule.

L'utilisation de ces qualificatifs permet tout d'abord d'envisager la description de familles de produits (grâce à l'attribut « alternative ») mais elle permet aussi de différencier les données spécifiques à chaque métier (vue) de celles partagées par l'ensemble des acteurs (commune).

3.3.1.3 Liens entre les entités

Dans le cycle de conception, la description fonctionnelle du produit est principalement utilisée en conception préliminaire tandis que la représentation structurelle intervient plutôt en conception détaillée avec l'utilisation des outils de CAO [Summers *et al.*, 01]. Le passage d'une description fonctionnelle vers une description structurelle est primordial. Le modèle produit doit garantir cette transformation en évitant les pertes d'informations.

Le lien Composant-Interface ne peut relier qu'un seul composant vers une ou plusieurs interfaces. La sémantique de ce lien correspond alors à : « Un composant possède une ou plusieurs interfaces » : voir figure 36.

Le lien Fonction-Composant permet d'identifier un ou plusieurs composants comme étant une solution technique pour une fonction. Ce lien traduit le fait que : « Un composant est une solution technique d'une fonction » : voir figure 36.

Enfin, le lien Interface-Fonction met en relation une ou plusieurs interfaces à une ou plusieurs fonctions. Ce qui signifie qu'« une ou plusieurs fonctions lient une ou plusieurs interfaces » : voir figure 36.

En conclusion, les liens Interface-Fonction et Fonction-Composant permettent de relier la description fonctionnelle et la description structurelle. Le lien Composant-Interface permet quant à lui d'affiner la description structurelle.

3.3.2 Transformations sur les entités du modèle produit

Le modèle produit retenu utilise un formalisme qui permet à chaque entité d'être décomposée et/ou agrégée suivant des mécanismes présentés dans les paragraphes suivants.

3.3.2.1 Décomposition

Une entité peut être décomposée en plusieurs entités du même type (figure 37). Ce mécanisme permet de raffiner la description du produit que ce soit au niveau structurel ou fonctionnel. Le niveau de décomposition structurel permet d'aller du produit dans sa globalité jusqu'à toutes les pièces le constituant.

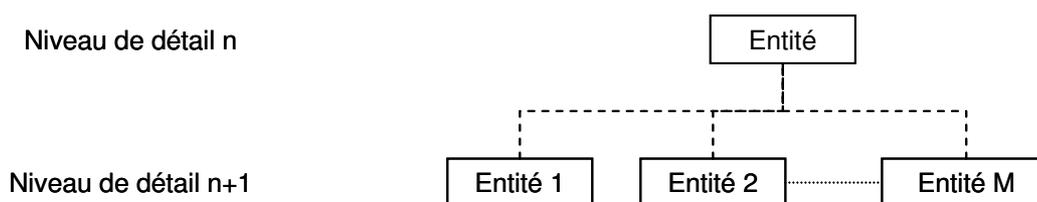


Figure 37 : Mécanisme de décomposition.

Deux types de décomposition existent, à savoir, la décomposition en « ET » (l'ensemble des entités filles peut se substituer à l'entité mère) et la décomposition en « OU » (chacune des entités filles peut se substituer à l'entité mère). Le graphisme présenté dans la figure 37 ne contient pas en elle la sémantique permettant de savoir quel type de décomposition il s'agit. Pour connaître le type de la décomposition il faut se référer à l'attribut de l'entité décomposée (i.e. alternative, commune ou vue) [Dufaure, 08].

Décomposition en « ET »

La décomposition en « ET » ne peut concerner que des entités dont l'attribut est « commune » ou « vue ». Plusieurs exemples de décomposition peuvent être envisagés :

- une décomposition « structurelle » concerne un composant qui se décompose en plusieurs sous-composants,
- une décomposition « fonctionnelle » concerne une fonction qui se décompose en plusieurs sous-fonctions,
- une décomposition dite « multivue » permet l'ajout de données propres à une expertise à une entité. La somme de toutes ces données permet de définir entièrement l'entité.

Décomposition en « OU »

La décomposition en « OU » ne peut concerner que des entités dont l'attribut est « alternative ». Ce type de décomposition permet surtout de décrire des alternatives de solutions. Les entités issues de cette décomposition portent alors l'attribut « commune » pour que chaque expertise puisse manipuler l'ensemble des nouvelles entités générées.

Une décomposition d'une entité alternative permet également de décrire une famille de solutions. Par exemple, dans le cas d'un roulement, ce type de décomposition permet de décrire dans un même modèle les diverses solutions technologiques existantes, c'est-à-dire, un roulement à billes, à rouleaux coniques ou à aiguilles.

3.3.2.2 Agrégation

L'agrégation permet le mécanisme inverse de la décomposition. Plusieurs entités du même type peuvent être agrégées pour donner une entité globale qui regroupe les données et les propriétés des entités agrégées. L'agrégation de fonctions est plus particulièrement concernée par ce mécanisme. L'exemple académique est celui d'une fonction représentant une liaison linéaire annulaire en parallèle avec une fonction représentant une liaison rotule, qui, une fois agrégées, forment une fonction représentant une liaison pivot ce qui est équivalent d'un point de vue cinématique.

Le modèle produit présenté se veut relativement générique pour pouvoir conserver l'efficacité des outils existants en conception. Pour ce faire, ce modèle propose d'utiliser des

entités dont la sémantique, la taxonomie et les liens ont été définis et qui permet d'effectuer des opérations de décomposition et d'agrégation de ces mêmes entités.

3.3.3 Correspondance entre le modèle produit et les outils et modèles utilisés en conception

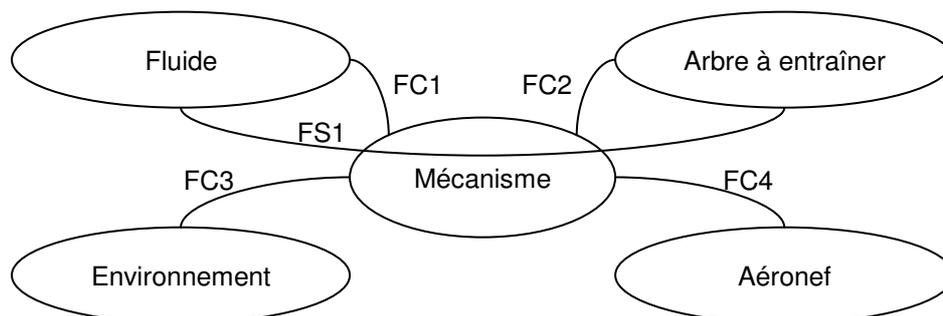
Ce paragraphe met en évidence la correspondance qui peut exister entre, d'une part, les outils et les modèles utilisés couramment en conception et d'autre part le modèle produit. Cette correspondance a été mise en évidence dans les travaux de Dufaure [Dufaure, 05]. Parmi les outils et les modèles de conception, l'auteur a retenu le diagramme pieuvre, le diagramme FAST et la modélisation cinématique (i.e. décomposition du produit en sous-ensembles connectés entre eux par des liaisons cinématiques au sens de la théorie des mécanismes). Nous reprendrons ce choix mais en changeant le support d'étude.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'utiliser comme support d'étude une turbine haute pression. Une description plus complète de son évolution dans le processus de conception sera développée dans le chapitre 5.

Ce choix est guidé par l'utilisation de l'activité « tolérancement géométrique » dont les mécanismes de transferts de spécifications géométriques sont à l'origine de nos propositions. Ainsi, le diagramme pieuvre, le FAST et le modèle cinématique permettent de caractériser la propagation des spécifications géométriques.

3.3.3.1 Diagramme pieuvre

Un des premiers outils utilisés en conception est le diagramme pieuvre également appelé diagramme des interacteurs. En phase de conception préliminaire, les concepteurs utilisent couramment cet outil pour représenter le mécanisme à concevoir ainsi que son environnement. Cette représentation a pour but de décrire les fonctions de service (FS) du mécanisme. Pour l'exemple d'une turbine haute pression, le diagramme pieuvre est décrit dans la figure 38.



- FS1 : Transformer une puissance fluide en puissance mécanique de rotation
- FC1 : Canaliser les fluides
- FC2 : Lier à l'arbre
- FC3 : S'adapter à l'environnement
- FC4 : S'adapter à l'aéronef

Figure 38 : Diagramme pieuvre du mécanisme à concevoir.

Le diagramme pieuvre permet de mettre en évidence d'une part les fonctions que doit remplir le mécanisme (FS1) et d'autre part les fonctions (contraintes) liées à l'intégration du mécanisme dans son milieu (FC2 à FC4). A l'aide du modèle produit, le mécanisme à concevoir peut alors être décrit par la figure 39 :

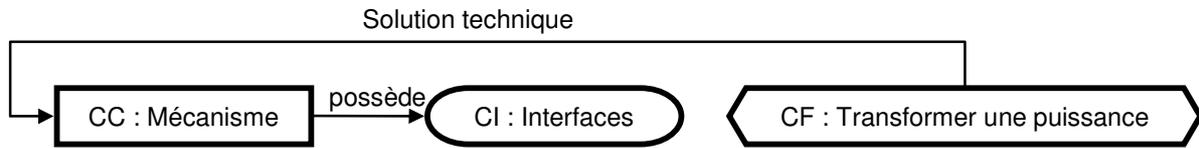


Figure 39 : Description du mécanisme à concevoir [Dufaure, 05].

La correspondance entre les modèles est ici parfaite : la signification du diagramme tel qu'il est représenté figure 38 est conforme à ce que le modèle produit décrit à savoir qu'un composant (CC : Mécanisme) est une solution technique de fonctions (CF : Transformer une puissance [fluidique en puissance mécanique de rotation]).

A ce stade là, il est possible de décomposer le modèle produit afin de faire apparaître toutes les entités du diagramme pieuvre (Fluide, Arbre à entraîner, Environnement et Aéronef) et le détail des fonctions. Il suffit alors de lier les interfaces de ces entités ainsi que les entités du mécanisme aux diverses fonctions.

3.3.3.2 FAST (Function Analysis System Technique)

Les concepteurs utilisent généralement une représentation sous la forme d'un diagramme FAST pour décrire les solutions techniques satisfaisant les fonctions.

Seule la fonction de service FS1 « Transformer une puissance fluidique en puissance mécanique », parmi les fonctions décrites précédemment (voir figure 38), sera à présent détaillée pour limiter la complexité de l'étude. Cette fonction est associée à de nombreux critères - nous retiendrons celui relatif au rendement énergétique - et se décompose en sous-fonctions dont la fonction « Guider en rotation ». Une double décomposition (voir figure 40) peut être réalisée : structurelle à gauche et fonctionnelle à droite.

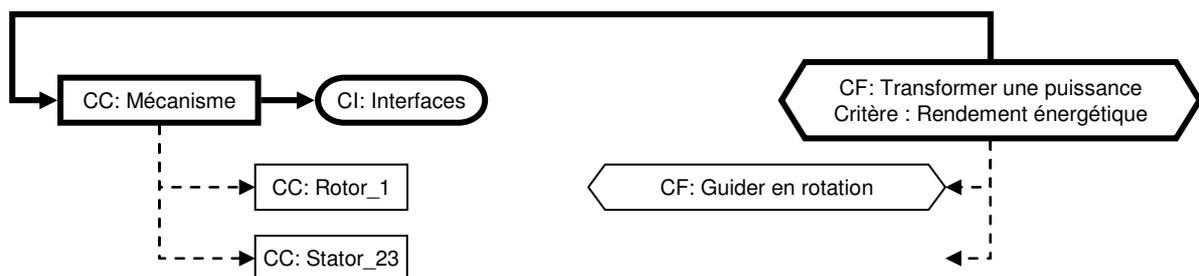


Figure 40 : Décomposition de la fonction de service FS1 et du mécanisme dans le modèle produit.

Le rendement énergétique d'une turbine haute pression est grandement influencé par une pièce particulière à savoir l'anneau de turbine. Il est donc nécessaire de faire apparaître cette pièce dans le modèle produit en modifiant légèrement la décomposition proposée précédemment (voir figure 41).

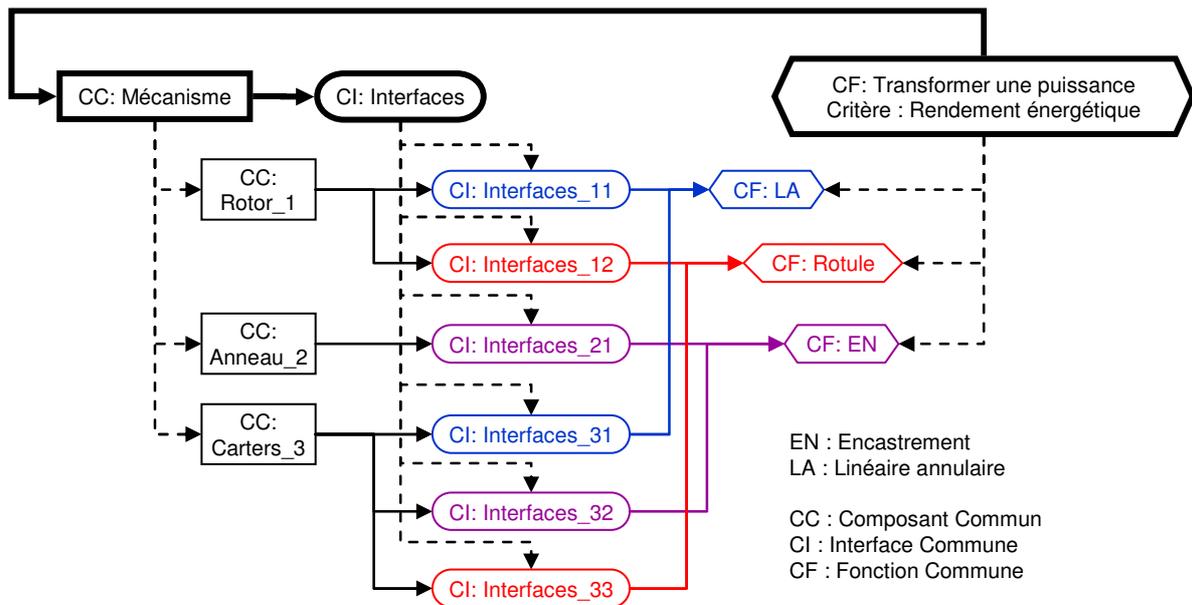


Figure 41 : Exemple de décomposition structuro-fonctionnelle du modèle produit.

Ces deux décompositions du modèle produit ne sont pas totalement différentes puisqu'il suffit d'utiliser les mécanismes d'agrégation pour rassembler les composants « CC: Carters_3 » et « CC: Anneau_2 » en « CC: Stator_23 ». De même les fonctions « CF: LA », « CF: Rotule » et « CF: EN » peuvent être agrégées pour former la fonction « CF: Guider en rotation ». Le modèle produit permet de prendre en compte l'aspect multivue. Etant donné le niveau de décomposition faible du produit, les représentations proposées sont dans une vue « globale » c'est-à-dire que toutes les expertises y ont accès à ce stade de la conception du produit.

L'intérêt de l'outil diagramme FAST est conservé dans le modèle produit. Ainsi, un concepteur aguerri à cet outil peut continuer à l'utiliser et enrichir, de manière transparente pour lui, le modèle produit tournant en arrière plan.

3.3.3.3 Modélisation cinématique

En enrichissant le modèle produit, que ce soit par décomposition structurelle ou décomposition fonctionnelle, le concepteur est amené à décrire des relations cinématiques entre les composants du mécanisme à concevoir.

Il est possible de partir du modèle produit pour extraire un schéma cinématique et inversement. En reprenant la représentation du modèle produit de la figure 41, le schéma cinématique minimal équivalent obtenu est présenté figure 42.

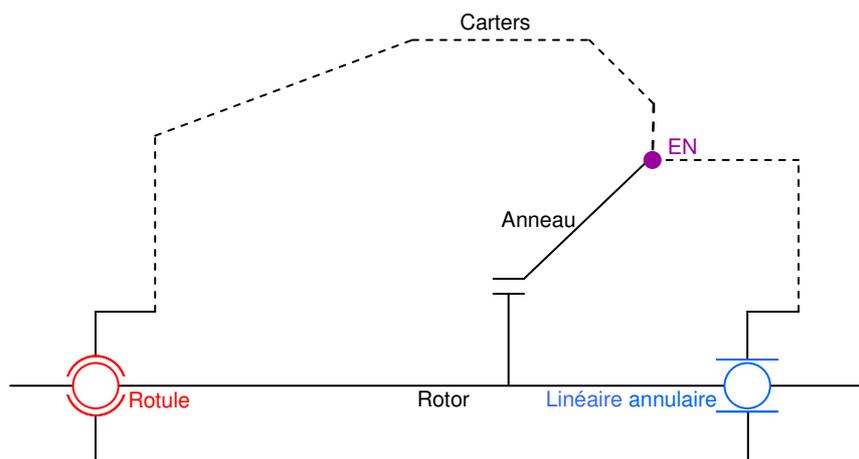


Figure 42 : Schéma cinématique minimal d'une turbine haute pression.

Ce modèle cinématique peut servir de base de travail aux acteurs de la conception. Il est en effet plus aisé de travailler avec ce genre de modèle. Par exemple, la solution pour l'encastrement n'est ici pas définie. Il existe un certain nombre de solutions permettant de répondre à cette fonction mais qui dégraderont plus ou moins le critère du rendement énergétique. En complétant ce schéma cinématique, il est possible d'enrichir, par opération inverse, le modèle produit qui servira à son tour à d'autres acteurs lors de la conception détaillée. Notons que les traits en pointillés sur le schéma cinématique ne jouent qu'un rôle cosmétique pour réunir les diverses interfaces. La définition des formes extérieures provient d'une autre fonction, non formulée dans la décomposition de FS1, renvoyant, entre autre, à l'encombrement de la turbomachine.

3.3.4 Synthèse

Le modèle produit décrit permet de représenter le produit à concevoir tout au long de son cycle de conception. Un des intérêts principaux est qu'il est exploitable dès la phase de conception préliminaire ce qui peut s'avérer être un enjeu primordial pour l'aide à la décision. Mais il peut, plus classiquement, être également utilisé en phase de conception détaillée en enrichissant les données liées aux entités qui le composent. Le passage de la phase de conception préliminaire à la phase de conception détaillée doit pouvoir gérer par le modèle produit [Dufaure, 05]. En permettant de conserver l'utilisation d'outils et de modèles éprouvés, le modèle produit se veut aussi transparent que possible pour les acteurs. La difficulté est alors d'incorporer le résultat des travaux effectués avec un outil ou modèle vers le modèle produit [Chettaoui, 08]. La traçabilité des informations techniques (i.e. liées au produit) est ainsi assurée au cours du processus de conception. Les états successifs du processus de conception sont liés les uns aux autres et s'enchaînent de manière continue, ce qui est souvent très difficile en utilisant un seul des outils et modèles présentés précédemment. Enfin, les données techniques (produit) sont centralisées dans un même modèle, les rendant accessibles par tous les acteurs du cycle de conception. L'utilisation de l'attribut « vue » permet de « filtrer » les données visibles par chaque acteur, ainsi on s'assure que chaque expertise a, à sa disposition, les données strictement nécessaires à l'exécution de son activité.

3.4 Conclusion

L'environnement PPO présenté dans ce chapitre repose sur un modèle de référence distinguant le système décisionnel (modélisé par la structure GRAI R&D et les réseaux GRAI) et le système technologique (modélisé par le modèle produit d'IPPOP et les réseaux GRAI R&D). Cet environnement s'appuie en grande partie sur les travaux de recherche issus du projet IPPOP. Seul le modèle processus de conception n'a pas été retenu au profit des réseaux GRAI R&D pour leur richesse sémantique.

L'ensemble des fonctionnalités des modèles a été complètement présenté. Ils permettent la gestion et la manipulation de données tout au long du cycle de conception. Les spécifications utilisées par les différents modèles sont décrites. Ces spécifications sont de type projet. Certaines sont des spécifications produit alors que d'autres sont également liées aux processus et/ou à l'organisation.

L'utilisation des modèles présentés dans ce chapitre permet de conserver l'historique de la mise en place et des modifications des spécifications projet lors du cycle de conception, que ce soit au niveau du produit, des processus ou de l'organisation. Le chapitre suivant se focalise sur les mécanismes permettant le transfert de ces spécifications. Ces spécifications, parfois exprimées dès l'élaboration du cahier des charges, ont un impact sur la définition des pièces, des processus de conception, etc. En s'appuyant sur les modèles présentés, ces mécanismes seront, d'une part, formalisés pour s'affranchir du vocabulaire spécifique à chaque modèle puis, d'autre part, généralisés afin d'étendre les concepts au triptyque Produit-Processus-Organisation. Le chapitre 5 met en avant l'intérêt de la formalisation des transferts de spécifications dans l'utilisation de leviers d'action associés à des indicateurs de performance prenant en compte des aspects produit, processus et organisation.

Le modèle de données retenu pour illustrer les transferts de spécifications projet est fortement inspiré du modèle PPO du projet IPPOP. Une description complète des modèles produit, processus et organisation constituant ce modèle a permis de mettre en valeur l'ensemble de leurs fonctionnalités. Les spécifications et données manipulées par ces différents modèles ont été identifiées. Les liens entre modèles ont été établis afin de montrer les transferts de spécifications dans chaque modèle ainsi qu'entre les modèles. L'ensemble de ces descriptions est un préalable à la généralisation et à la formalisation de transfert de spécifications dont les mécanismes sont développés et illustrés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 Déploiement des transferts de spécifications dans un environnement PPO

La problématique du transfert de spécifications est motivée par la mise en place d'indicateurs de performance. En formalisant les transferts de spécifications, l'objectif est de rendre l'utilisation de leviers d'action associés à ces indicateurs plus efficace car un levier d'action, censé améliorer des performances, peut également en dégrader d'autres, d'autant plus si les performances attendues cumulent les exigences des clients et de l'entreprise.

Des propositions d'indicateurs de performance dits globaux font apparaître des aspects qui ne sont traditionnellement pas formalisés par les outils actuels [Gonçalves *et al.*, 07] (voir Tableau 4). Elles s'appuient sur la définition d'indicateurs de performance provenant des vues produit, processus et organisation [Christofol *et al.*, 06] (voir Tableau 5). La maîtrise de la conception y est *a priori* assurée en prenant en compte des aspects également liés aux processus de conception (en gras dans le Tableau 4) et à l'organisation (en italique dans le Tableau 4). Les limites de ces propositions proviennent des effets des décisions prises résultant de l'utilisation des indicateurs proposés. En effet, les conséquences ne sont pas gérées, qu'elles soient positives ou négatives, car les liens entre les informations sont inconnues et les relations entre les indicateurs [Rodriguez *et al.*, 09] ne sont pas prises en compte.

FT3 : Entraîner en rotation une éprouvette normalisée			
<i>Solutions</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>	<i>Note (IG)</i>
S3.1 : Moteur pneumatique, réalisation en interne, équipe de 2 personnes sur 2 jours	- Vitesse de rotation - <i>Partenariat avec l'entreprise X</i>	- Bruit - Manque de connaissances	3/10
S3.1 : Moteur brushless 6000tr/min Alim DC ou 230V, réalisation en interne, équipe de 2 personnes sur 2 jours	- Vitesse de rotation - <i>Experts électriciens disponibles</i>	- Alimentation spécifique	5/10
S3.1 : Moteur à 3000tr/min + Amplificateur de vitesse + Alim 230V, réalisation en interne, équipe de 2 personnes sur 2 jours	- Démarche de conception connue - <i>Experts électriciens disponibles</i>	- Vitesse de rotation originelle à modifier	7/10

Tableau 4 : Proposition de caractérisation et de notation par indicateurs globaux (IG) pour aider au choix de solutions techniques [Gonçalves *et al.*, 07].

La question de la traçabilité des données de conception et plus particulièrement des spécifications est primordiale. Le transfert de spécifications produit a fait l'objet de développements dans le cadre particulier du tolérancement géométrique. Nous proposons d'étendre les concepts initiés par les transferts de spécifications géométriques d'une part aux

spécifications produit, et d'autre part aux spécifications projet formulant des conditions sur des caractéristiques techniques et organisationnelles.

Indicateurs "produit"	Indicateurs "organisation"	Indicateurs "processus"
<ul style="list-style-type: none"> - Coût, performances, fiabilité, disponibilité, - Maturité (<i>Capability Maturity Model</i>), - Granularité, - Cohérence, - Innovation : technologique (brevet) marché (brevet) entreprise (savoir-faire, secret). 	<p style="text-align: center;">Sociocognitif :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vocabulaire et langage communs - Sens et valeurs partagés, - Finalités et objectifs partagés. <p style="text-align: center;">Pragmatique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Savoir-faire et compétences reconnues, - Communauté de pratique et apprentissage collectif - Connaissances incorporées (localisées et investies) dans l'action (objets frontières et acteurs interfaces). 	<p style="text-align: center;">Systémique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Activités (méthode, outils méthodologiques, acteurs, coût, délais, ...) - Moyens, outils et matériels supports (SI, SAD, ...), - INPUT (informations, ressources matérielles, ...), - OUTPUT (ERI, prototypes, brevets, rapports, BdD).

Tableau 5 : Typologie d'indicateurs des projets de conception de produits innovants [Christofol et al., 06].

Nous allons montrer comment les mécanismes de transferts de spécifications permettent d'en assurer leur traçabilité.

Ce chapitre propose, dans une première partie, des définitions liées aux spécifications. Ces définitions proviennent des concepts développés par l'ISO TC 213 [Srinivasan, 03] dédiés à des caractéristiques géométriques. Elles sont généralisées à des caractéristiques liées plus généralement au produit, à la planification et/ou à la gestion des ressources humaines et matérielles. La problématique de l'estimation de la performance sera également abordée. Dans une deuxième partie, les mécanismes de transferts de spécifications projet, permettant d'assurer leur traçabilité, seront définis. Deux types de transferts de spécifications projet seront considérés : le transfert interniveaux et le transfert intervues [Gonçalves et al., 10]. Ces transferts seront déployés dans l'environnement de travail collaboratif présenté dans le chapitre précédent.

4.1 Des spécifications aux indicateurs de performance

La performance globale d'un projet, est assurée par la prise en compte des données manipulées par les processus de décision (i.e. le système pilotant) et de conception mais aussi celles issues de l'organisation du projet car elles sont, potentiellement, tout aussi influentes.

L'utilisation de spécifications est un moyen pour prendre en compte les incertitudes inhérentes aux modèles de simulation et aux différentes données qu'ils manipulent. Un indicateur de performance permet d'évaluer, à un instant donné, l'adéquation entre un état du projet en cours de développement et un objectif. Cette évaluation est obtenue en agrégeant des

spécifications déployées à l'intérieur du projet dans différents niveaux de détail et pour différents points de vue. Le résultat de cette agrégation est comparé à un objectif. La performance du résultat estimé est mesurée par des indicateurs de performance. La figure 43, permet de montrer ce principe dans le cas des spécifications géométriques. L'objectif est d'étendre ces concepts aux spécifications projet qui englobent les spécifications produit qui, elles-mêmes, englobent les spécifications géométriques.

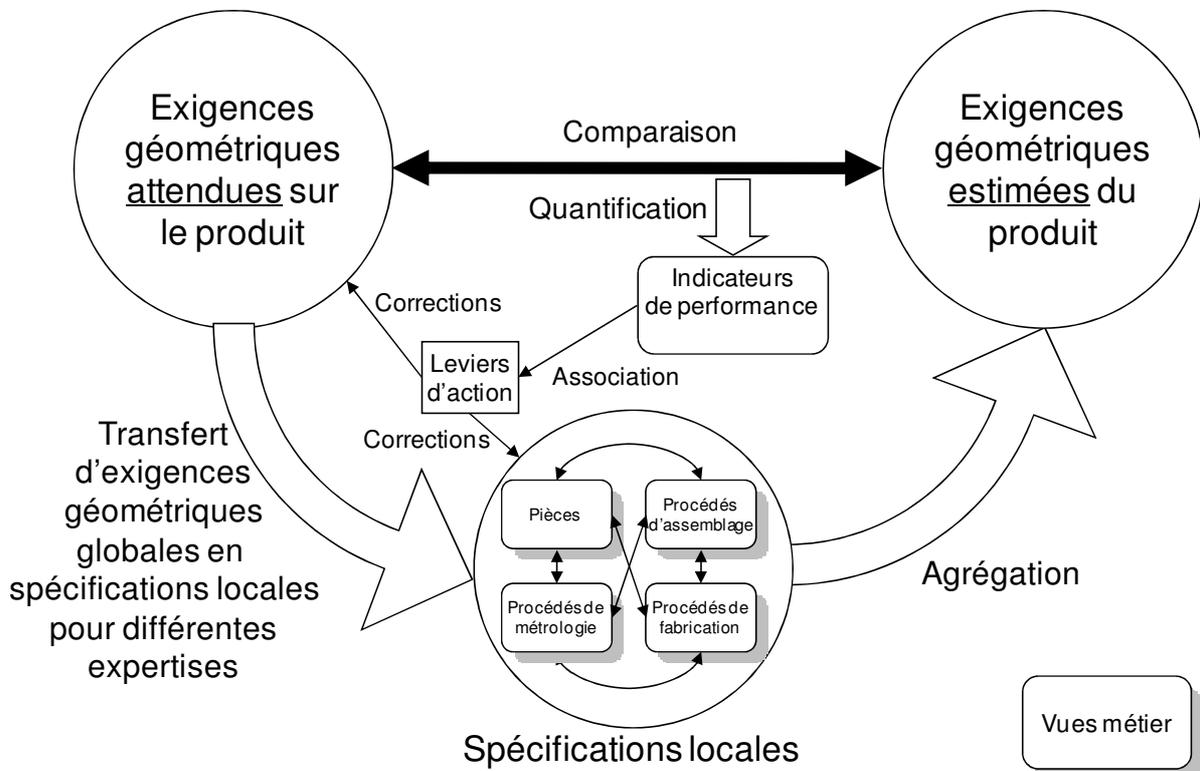


Figure 43 : Relations entre les spécifications géométriques globales et locales.

Considérons la **performance énergétique** d'une turbine haute pression. Cette performance projet, constituant un des principaux critères attendu en début de projet, est caractérisable par un critère technique (le rendement énergétique) et deux critères liés aux processus et à l'organisation (les coûts et délais de développement). Les coûts et délais pris en compte sont ceux engendrés par les diverses ressources mises en œuvre dans le cycle de conception excluant les coûts et délais de production, de maintenance, etc. Le rendement énergétique est fortement corrélé à une caractéristique géométrique : le jeu rotor/stator en sommet d'aubes de turbine haute pression [Pierre *et al.*, 09]. L'estimation de ce jeu rotor/stator, en prenant en compte tous les phénomènes physiques agissant sur la variabilité géométrique des composants constitutifs, est très complexe : il n'existe pas de modèle analytique permettant de l'obtenir. Les bases de connaissances enrichies par le savoir-faire et l'expérience de l'entreprise associées à des méthodes empiriques ne permettent que d'obtenir des estimations entachées d'incertitudes. Ces incertitudes engendrent, dans le cas de notre exemple, trop de variations sur l'estimation du rendement énergétique de la turbine haute pression. C'est pourquoi, des sous-ensembles de turbomachines, dont les turbines haute pression, sont systématiquement qualifiés sur banc d'essais et des corrections sont apportées en cours de développement afin de s'assurer du rendement énergétique. De plus, les coûts et les délais de conception exigés contraignent considérablement le cycle de conception de la turbine haute pression influençant les corrections à apporter en cours de développement. Ces corrections ne sont efficaces que si elles sont reliées à des leviers d'action associés à l'estimation de la performance énergétique de la turbine haute pression. Pour estimer cette

performance énergétique à des jalons particuliers du projet, des spécifications projet - i.e. de type PPO - locales doivent être agrégées. Le résultat de cette agrégation est comparé à des objectifs (i.e. des spécifications) projet globaux formulés en début de cycle de conception de la turbine haute pression. La performance énergétique de la turbine haute pression peut être quantifiée lorsque l'on effectue cette comparaison : voir figure 44.

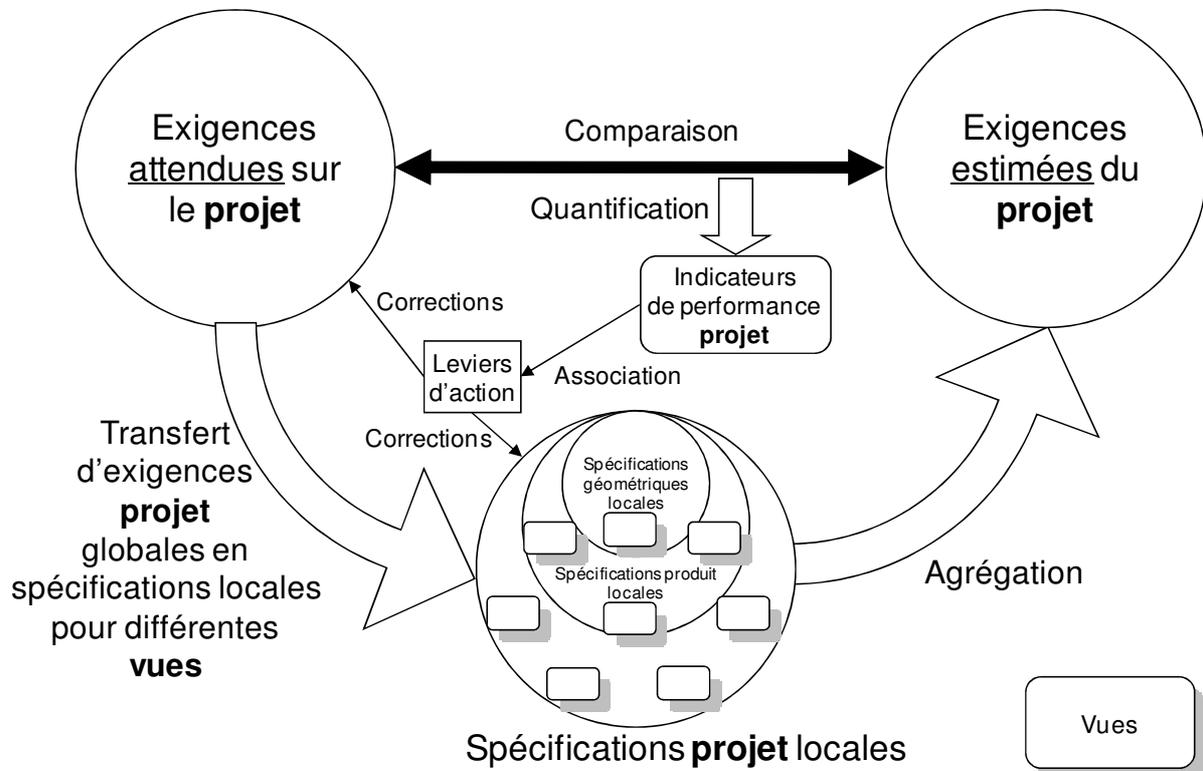


Figure 44 : Relations entre les spécifications projet globales et locales.

De manière générale, cette comparaison permet de quantifier un ensemble d'indicateurs de performance dont les valeurs sont souvent binaires (i.e. conformes ou non-conformes). Au cours du développement de la turbine haute pression, ces spécifications globales sont transférées vers des niveaux de détail de plus en plus affinés et vers de multiples expertises métiers participant au cycle de conception. En conservant l'historique de ces diverses transformations que nous appelons transferts de spécifications, il est possible d'assurer la traçabilité des spécifications. Cette traçabilité est primordiale pour garantir l'efficacité de leviers d'action associés aux indicateurs de performance.

L'exemple de la performance énergétique de la turbine haute pression illustre le fort couplage existant entre les spécifications produit (le rendement énergétique) et les spécifications de type processus et organisation (le coût et le délai de développement). Dans un contexte d'entreprise étendue où interviennent de multiples collaborateurs, cette problématique est d'autant plus exacerbée.

4.1.1 Spécifications dans le cycle de conception

Durant le cycle de conception, des spécifications sont déployées pour assurer que l'organisation, les processus et le produit répondent à leurs objectifs. Ces spécifications sont souvent cloisonnées, rendant la gestion globale du système de conception difficile. Traditionnellement, les spécifications produit sont mises en avant. En effet, du point de vue

de la conception, un produit répondant aux besoins exprimés par les utilisateurs fera dégager à l'entreprise des bénéfices. Or, avec la forte concurrence et les fluctuations de la croissance économique, avoir un produit techniquement viable ne suffit pas. La conception est influencée par les choix stratégiques (partenariat industriel, écologie, ...) et génère parfois, une fois le produit fini, des modifications (mises à jour, rappels, ...) que l'utilisateur prend en compte dans ses choix, au-delà du produit conçu en lui-même.

4.1.1.1 Spécifications géométriques

Les pièces fabriquées ne sont jamais géométriquement parfaites quel que soit le procédé de fabrication (usinage, fonderie, plasturgie, Resin Transfer Molding, ...) et les matériaux mis en œuvre. Pour assurer l'interchangeabilité des pièces, la variabilité des caractéristiques géométriques des pièces doit être maîtrisée par des spécifications géométriques. Les spécifications sont formalisées dans un langage graphique univoque permettant d'exprimer les limites admissibles des défauts géométriques [ISO 8015, 85] [ISO 286-1, 10] [ISO 406, 87] [ISO 1101, 04] [ISO 5459, 81].

Les spécifications géométriques peuvent être définies par une analyse qualitative puis quantitative pour garantir le respect d'une exigence fonctionnelle exprimée sur le produit. L'analyse qualitative permet de déterminer sur quels éléments géométriques de quelles pièces il convient de mettre en place un type de spécification géométrique. L'analyse qualitative est une analyse de causalité entre une exigence d'un produit et les défauts géométriques des pièces constitutives. L'analyse quantitative permet de déterminer les valeurs des intervalles de tolérance et des dimensions des zones de tolérance. L'analyse quantitative est une analyse de sensibilité reposant sur des méthodes déterministes et/ou stochastiques (méthode du pire des cas, méthodes statistiques, fiabilistes, etc.) [Srinivasan, 97] [Pillet *et al.*, 06] [Dantan et Qureshi, 09] [Ledoux *et al.*, 09]. Ces analyses reposent sur la formalisation de chaînes de cotes. Elles peuvent être déployées dès le début du cycle de conception.

La définition du produit évolue par le biais de multiples décompositions structuro-fonctionnelles (par exemple, dans la figure 45, la fonction F1 (Orientation) se décompose en 4 fonctions F5, F6, F7, F8). Les niveaux de détail permettent de relancer des analyses antérieures afin d'obtenir des spécifications sur les nouveaux éléments (i.e. les sous-assemblages ou les pièces) ajoutés au produit [Teissandier et Dufaure, 10]. Il est également possible d'effectuer des analyses qui n'avaient pas d'intérêt avant, soit parce que les éléments nécessaires n'étaient pas présents soit parce que les résultats obtenus par des analyses précédentes n'auraient pas donné de résultats pertinents. Idéalement, l'objectif, à la fin de chaque jalon du cycle de conception, est d'avoir les spécifications géométriques strictement nécessaires à la satisfaction du besoin exprimé et donc de ne pas chercher à tout spécifier.

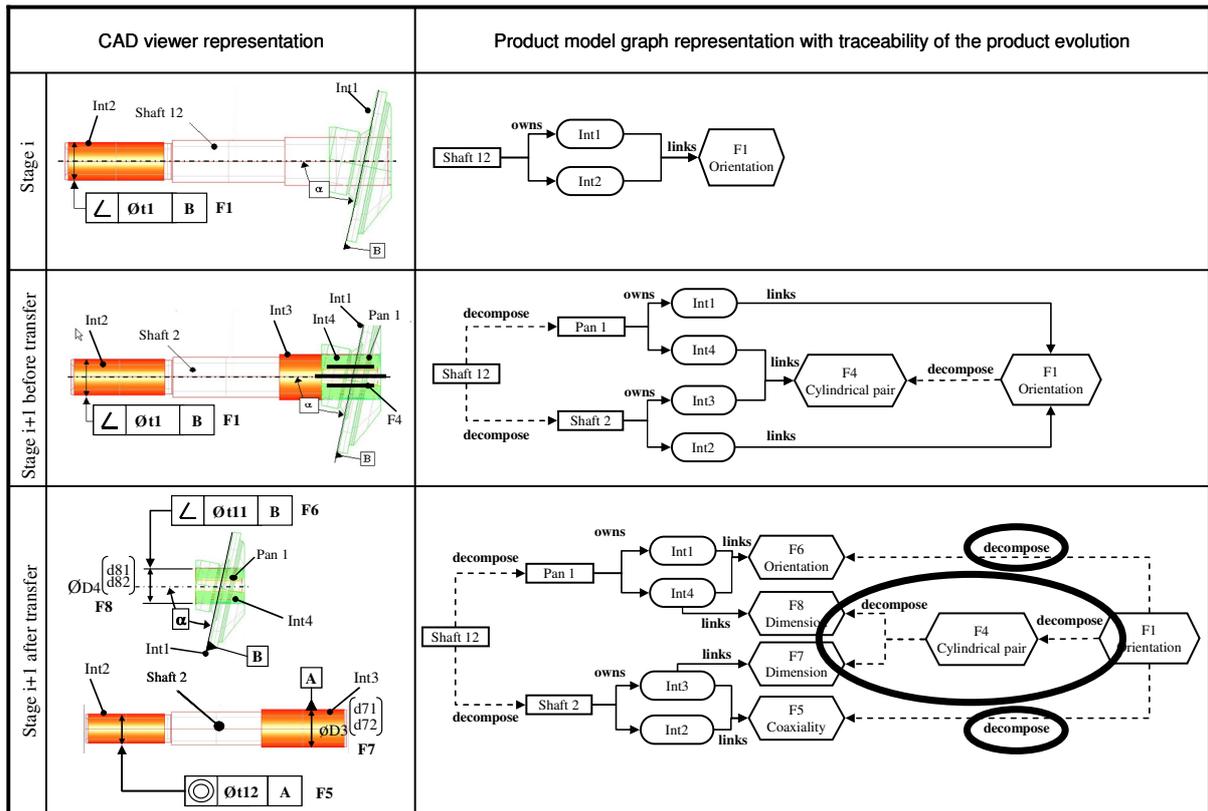


Figure 45 : Traçabilité de l'évolution du produit durant le cycle de conception [Dufaure et Teissandier, 08].

L'émergence de l'ingénierie concurrente (ou simultanée) [Sohlenius, 92], [Jo *et al.*, 93] dans un contexte d'entreprise étendue a suscité de nombreux développements dans les modèles de données liées au produit. En parallélisant les activités, l'entreprise cherche à obtenir des gains sur les temps et les coûts de développement. Dans ce contexte, les spécifications géométriques établies en bureau d'études, doivent être exploitées au plus tôt par les autres services de l'entreprise par exemple les services industrialisation et métrologie.

En passant d'un service à un autre, ces spécifications ne sont pas utilisées de la même manière. Par exemple, les spécifications géométriques définies par les concepteurs ne sont pas directement exploitables en industrialisation et métrologie [Mouton, 10]. Un transfert de type corrélation est nécessaire.

Avec une démarche d'industrialisation, les spécifications géométriques doivent être corrélées en spécifications procédés [Anwer *et al.*, 04]. En métrologie, elles doivent renvoyer à des caractéristiques à évaluer sur lesquelles seront exprimées des valeurs limites à ne pas dépasser [Ballu *et al.*, 07].

Lorsqu'un bureau d'études exprime une spécification géométrique, par exemple une planéité sur une surface nominale plane, cela signifie que la surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles et distants d'une valeur (voir figure 46). Du point de vue de la métrologie, cette spécification n'est pas directement exploitable. Le contrôle de la planéité consiste à extraire de la surface réelle un nombre fini de points avec lesquels sera caractérisé un écart de forme à l'aide du plan des moindres carrés (voir figure 46). Indépendamment des incertitudes liées aux instruments de mesure, l'incertitude de contrôle repose sur le nombre de points mesurés, leur répartition sur la surface réelle et sur le critère

d'association retenu pour construire le plan de référence (ici les moindres carrés) [Ballu *et al.*, 07].

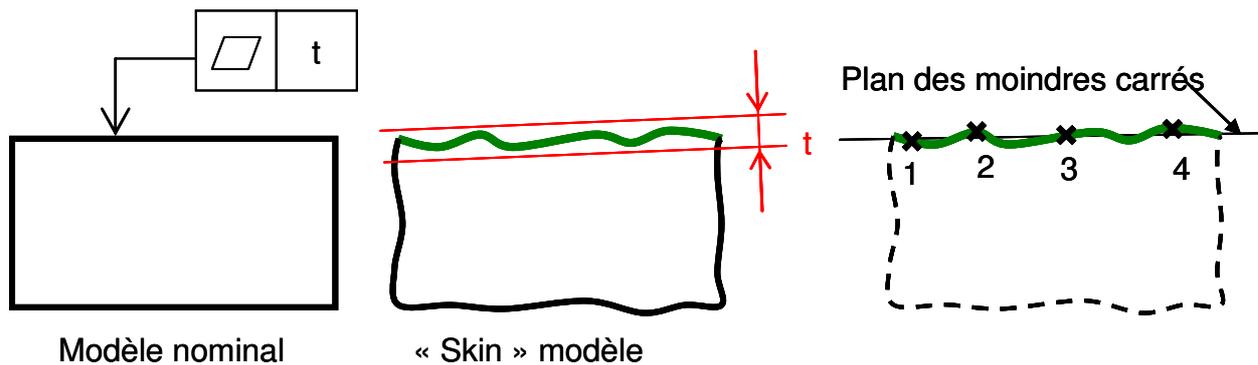


Figure 46 : Spécification géométrique (planéité) sur une surface nominale plane.

Nous proposons de généraliser la définition d'une spécification géométrique introduite dans l'ISO TC213 [Ballu *et al.*, 10] à toutes caractéristiques liées au produit puis à toutes caractéristiques liées au projet.

Les paragraphes suivants vont définir les spécifications produit et les spécifications projet. Cela permettra de formaliser et de généraliser les mécanismes de décomposition et de corrélation abordés précédemment. La formalisation de la traçabilité, appliquée aux spécifications projet, sera exploitée dans un environnement de type PPO.

4.1.1.2 Spécifications produit

Les éditeurs de solutions de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) ont investi et travaillé sur la problématique du *Product Lifecycle Management (PLM)* notamment au travers de Systèmes de Gestion de Données Techniques (SGDT) [Ebert et Man, 08]. Ces systèmes permettent, au cours du cycle de conception, de partager les données produit entre les diverses expertises métiers. Ces données peuvent être liées à des aspects géométriques mais pas uniquement.

Les spécifications produit sont des conditions sur les caractéristiques du produit dans le but de prendre en compte leur variabilité. Une caractéristique du produit peut être une dimension, une masse, une perméabilité, une tenue mécanique, une puissance, etc. La variation de diverses caractéristiques des pièces constitutives du produit, à un niveau de détail donné, induit potentiellement une variation sur les performances globales du produit. Une des sources d'incertitudes sur les performances du produit provient du couplage entre les spécifications c'est-à-dire de leurs relations de dépendance [Ouertani et Gzara, 08]. Ces relations ne sont pas toujours formalisées voire formalisables. Elles peuvent être triviales lorsqu'il s'agit par exemple de déterminer la masse totale d'un produit (somme des masses des pièces constitutives) mais sont, généralement plus complexes (comme, par exemple, la connaissance du rendement énergétique d'une turbine haute pression) voire parfois inconnues. Les modèles de l'environnement PPO ne permettent pas de formaliser toutes les relations, mais ont vocation à en formaliser le plus possible. De plus, il est nécessaire de prendre en considération le fait que les exigences fonctionnelles issues du cahier des charges, sont garanties par des spécifications sur des sous-ensembles et des pièces mais également par des spécifications sur les divers procédés à mettre en œuvre pour réaliser le produit [Mouton, 10]

(voir figure 47). Pour déduire les diverses spécifications à partir des exigences fonctionnelles plusieurs mécanismes de transferts sont réalisés.

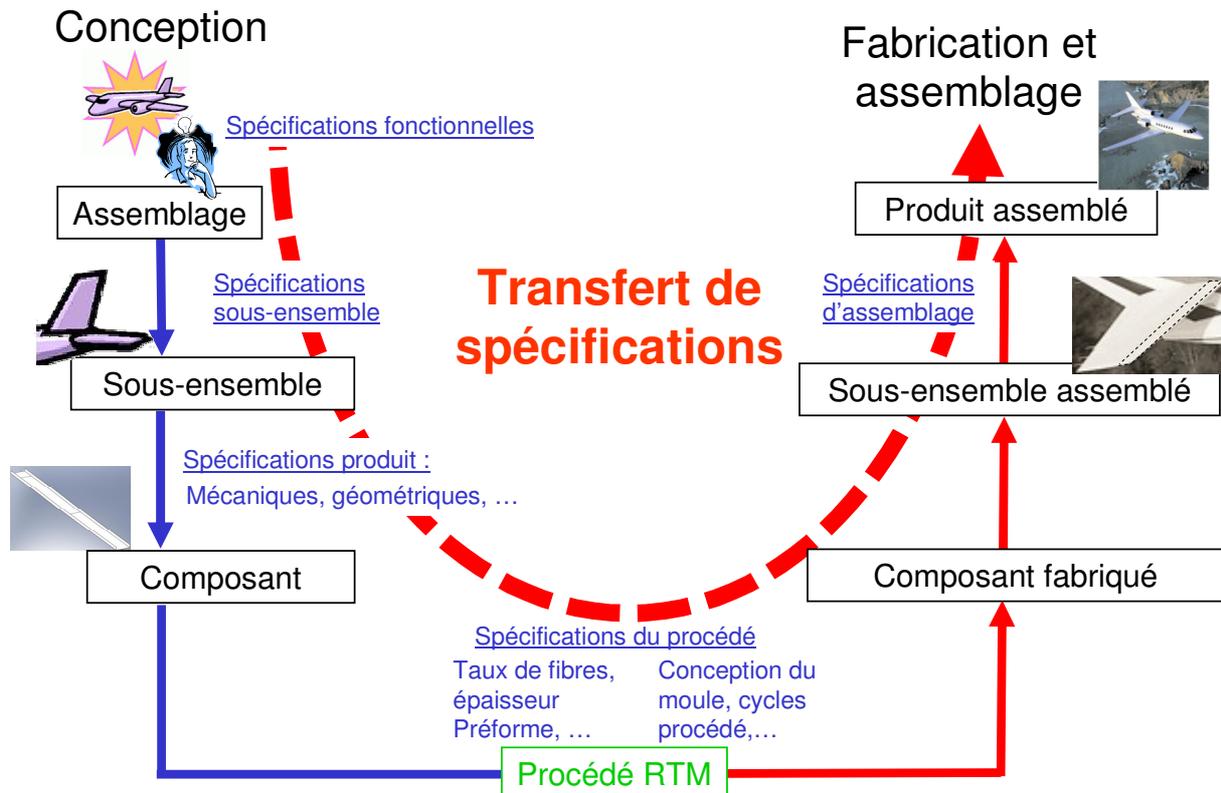


Figure 47 : Transfert de spécifications dans le cycle de vie partiel : adapté de [Mouton, 10]

Un modèle produit, tel celui retenu dans le chapitre précédent, peut conserver l'historique des transferts de spécifications produit durant le cycle de conception à travers différents niveaux de détail et pour différentes expertises métiers (modélisation géométrique, tolérancement géométrique, calcul de structure, usinage, fonderie, ...). Cela permet d'assurer la traçabilité des spécifications produit [Roucoules *et al.*, 06].

4.1.1.3 Spécifications projet

Les spécifications projet sont manipulées par divers outils sans réels liens directs. En effet, l'utilisation d'un *Enterprise Resource Planning (ERP)* assurant la traçabilité des spécifications de planification et de gestion des ressources n'est que peu mise en relation avec les SGDT qui gèrent les spécifications techniques. Ces deux systèmes ont pourtant comme objectif commun d'optimiser le cycle de conception.

Les coûts et les délais de développement sont des exemples de caractéristiques projet que l'on cherche à maîtriser en permanence. Ces caractéristiques dépendent à la fois de la complexité physique du produit, de la complexité des activités des divers processus du projet ou encore des priorités de l'entreprise. Pour être efficace, la traçabilité des spécifications projet doit être déployée dans une plateforme PPO. Seul ce type de plateforme permet la prise en compte de l'ensemble des données manipulées pendant un projet.

4.1.2 Indicateurs de performance

La mesure de la performance de l'entreprise a fait l'objet de travaux dès les débuts des années 90 ([Maskell, 91], [Wisner et Fawcett, 91]). Les indicateurs de performance y sont utilisés afin de caractériser, à un instant donné, la performance par rapport à des objectifs fixés. Les recherches sur cette problématique vont générer une multitude d'approches différentes. Une extension de la liste proposée par Robin [Robin, 05], recense, de manière non exhaustive, les exemples les plus connus :

- le système *Productivity Measurement and Enhancement System (ProMES)* [Pritchard, 90],
- Economie GRAI (ECOGRAI) [Bitton, 90] [Doumeingts *et al.*, 98],
- le *Baldrige Quality Award* [Wisner et Fawcett, 91],
- le *Balanced Scorecard* [Kaplan et Norton, 93] [Kaplan et Norton, 96],
- les compléments sur la pyramide de la performance [Lynch et Cross, 95],
- la « *Goal / Question / Metric approach* » [Park *et al.*, 96],
- le « *Performance Prism* » [Neely *et al.*, 02],
- les approches floues [Berrah *et al.*, 97] [Berrah *et al.*, 08] et multicritères [Roy et Bouyssou, 93] [Ducq, 07],
- l'approche « *Performance Measurement System* » [Kersseens-van Drongelen et Bilderbeek, 99].

Les systèmes de mesure cités précédemment sont, en majeure partie, orientés vers la compréhension globale de l'organisation de l'entreprise et ne sont pas prévus pour évaluer en particulier un système de conception. Les interactions entre stratégies, objectifs ou indicateurs ne sont pas prises en compte. Certaines approches consentent qu'il soit nécessaire de décomposer la stratégie et les objectifs à travers toute la structure organisationnelle. C'est le cas des approches suivantes :

- l'*Integrated Performance Measurement Framework* [Nanni *et al.*, 92],
- le *Performance Pyramid System (PPS)* [Judson, 96],
- l'*European Network for Advanced Performance Studies (ENAPS) Performance Measurement Cube* [Bradley et Jordan, 96],
- le modèle de Perez *et al.* [Perez *et al.*, 03].

Ces approches mettent en évidence la présence d'interactions entre les activités sans pour autant expliciter leur nature. Dans tous les cas, les seules méthodes existantes de définition d'indicateurs de performance ne sont appliquées qu'aux seuls domaines de la production ou de la gestion des organisations [Robin, 05].

Les interactions ne peuvent être prises en compte, dans le contexte particulier du système de conception, que si la modélisation de l'organisation de l'entreprise, des activités et du produit rassemble l'ensemble des données utilisées au cours du cycle de conception.

4.1.2.1 Indicateurs de performance techniques

La finalité des indicateurs de performance technique est d'évaluer l'adéquation entre les fonctionnalités du produit et les besoins exprimés dans le cahier des charges. Par exemple, un indicateur de performance de masse caractérise la conformité du produit vis-à-vis d'un objectif de masse maximale. Certains indicateurs sont calculables directement (comme la masse maximale) alors que d'autres sont plus difficilement chiffrables faute de modèles ou de

méthodes donnant des résultats avec des incertitudes acceptables comme par exemple la détermination du rendement énergétique d'une turbine haute pression.

4.1.2.2 Indicateurs de performance projet

Les indicateurs de performance projet englobent les indicateurs de performance techniques et permettent en outre d'évaluer l'adéquation entre le déroulement d'un projet et la planification prévue.

Certains travaux de recherche catégorisent les indicateurs de performance par rapport à leur champ d'influence. Il est alors possible d'utiliser distinctement des indicateurs produit, des indicateurs processus (de conception) ou des indicateurs organisation [Christofol *et al.*, 06] en fonction de l'aspect à évaluer.

Le plus souvent les spécifications prennent en compte plusieurs aspects comme, par exemple, les coûts et les délais de développement. Ces derniers renvoient :

- au produit : choix des solutions, complexité des solutions retenues, ...,
- aux processus : exactitude des informations permettant les décisions, activités du processus de conception réalisées au sein de l'entreprise ou sous-traitées, ...,
- à l'organisation : optimisation de l'utilisation des ressources, stratégie d'entreprise, etc.

4.2 Transferts de spécifications

Les mécanismes de transferts de spécifications présentés et développés dans les prochains paragraphes s'appuient sur des études mettant en évidence des transferts pour des spécifications géométriques [Dufaure et Teissandier, 08].

En généralisant ces mécanismes aux spécifications projet, l'objectif est d'asseoir la robustesse des leviers d'action associés aux indicateurs de performance. Dans une première partie, les transferts de spécifications géométriques servant de base à nos propositions seront présentés et, dans un second temps, les mécanismes de transferts appliqués aux spécifications projet seront définis.

4.2.1 Transferts de spécifications géométriques

Deux types de transferts de spécifications peuvent s'appliquer aux spécifications géométriques : le transfert par rapport au niveau de détail aussi appelé transfert interniveaux et le transfert en fonction de la vue métier aussi appelé transfert intervues : voir figure 48.

Une problématique connexe au transfert de spécifications est celle de l'adaptation au niveau de détail et à la vue métier [Ballu *et al.*, 07]. L'auteur met en évidence la nécessité d'adapter les spécifications géométriques en fonction, d'une part, du degré de précision nécessaire à la compréhension du produit à un instant donné et d'autre part à l'expertise métier manipulant les spécifications géométriques issues d'autres expertises.

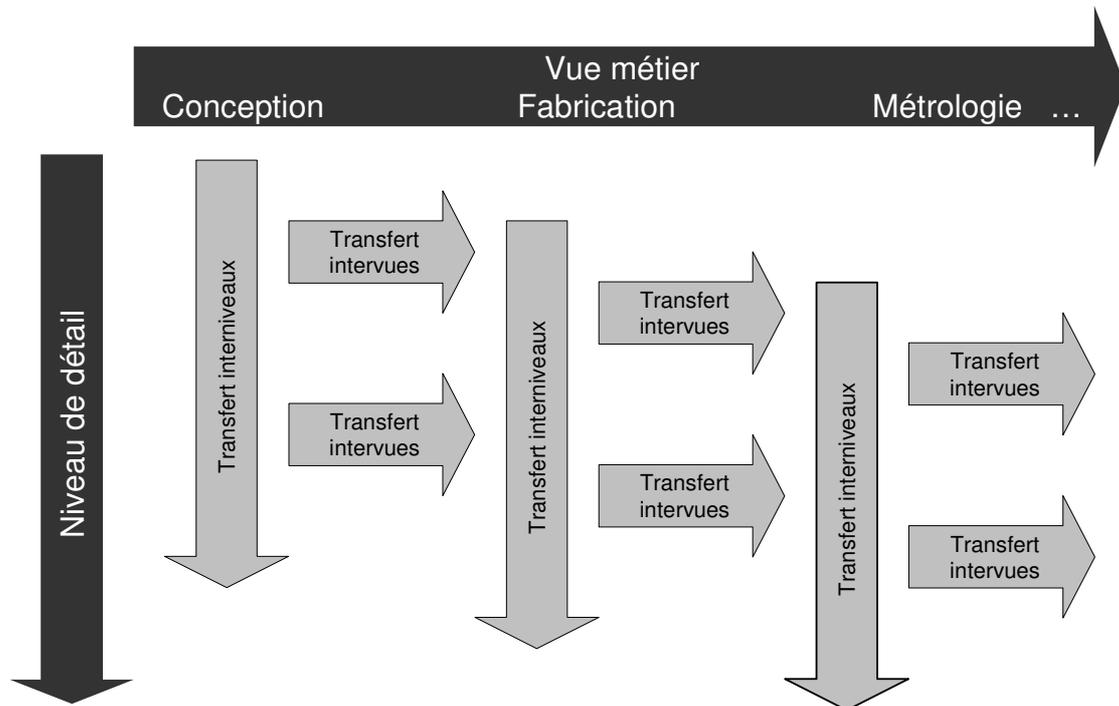


Figure 48 : Transfert de spécifications interniveaux et intervues : adapté de [Ballu et al., 07].

Ces adaptations peuvent être envisagées comme la partie qualitative des mécanismes de transferts de spécifications géométriques. La partie quantitative correspond, quant à elle, à la mise en œuvre d'outils ou de méthodes, plus ou moins formalisées, permettant de chiffrer les grandeurs numériques des spécifications géométriques nécessaires à la définition du produit.

4.2.1.1 Transfert interniveaux de spécifications géométriques

Au cours du cycle de conception, le niveau de détail du produit s'affine jusqu'à ce que, en conception détaillée, des spécifications géométriques ISO puissent être mises en place sur les dessins de définition des pièces. Pour aider les concepteurs à prendre leurs décisions (de concepts, d'architectures ou de solutions techniques), il n'est pas toujours indispensable d'avoir un niveau de détail très fin : le niveau de définition des spécifications doit s'adapter par transferts successifs à celui du produit et inversement. Ce transfert interniveaux de spécifications géométriques est illustré figure 49.

Un concepteur peut vouloir, dès la phase de conception préliminaire, mettre en place des exigences géométriques comme par exemple deux surfaces de forme quelconque en vis-à-vis (i.e. spécifiées en zone commune). Les normes liées aux spécifications géométriques n'ont pas été prévues pour être utilisées dans cette phase de conception, mais le symbolisme de cette norme peut être détourné pour être utilisé plus tôt au cours du cycle de conception.

Lorsque le niveau de détail du produit s'enrichit, il est alors possible de transférer les exigences géométriques d'un niveau de détail à un autre. Dans ce même exemple, les deux surfaces nominalement quelconques sont positionnées l'une par rapport à l'autre, par l'intermédiaire de liaisons glissières. La spécification géométrique de surface quelconque en zone commune des deux surfaces réelles renvoie alors à des exigences sur la localisation des axes des glissières (par exemple une coaxialité des axes des glissières).

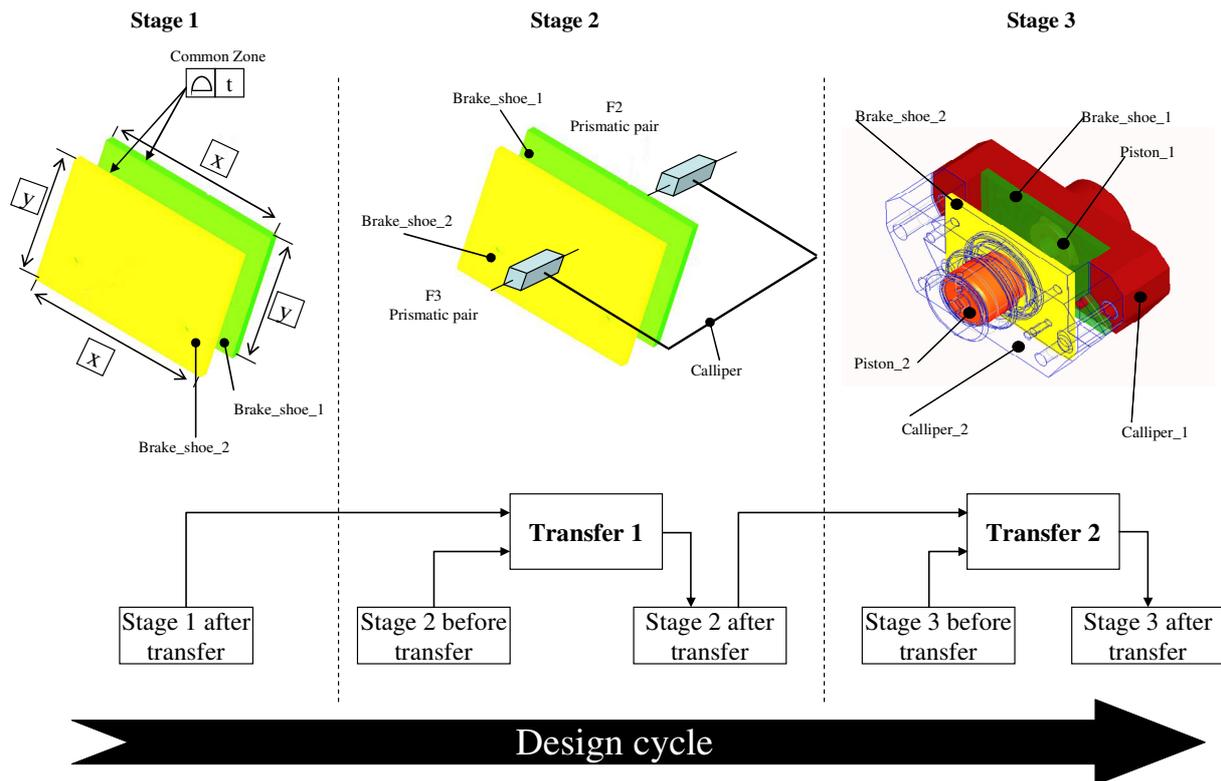


Figure 49 : Transfert interniveaux pour l'expertise tolérancement géométrique [Dufaure et Teissandier, 08].

Le transfert interniveaux de spécifications géométriques n'est complet que lorsque des outils de calculs de chaînes de cotes sont employés afin de définir les valeurs numériques des tolérances associées à ces spécifications.

En généralisant et en formalisant les concepts du transfert interniveaux de spécifications géométriques, il est possible de les étendre à l'ensemble des spécifications manipulées au cours d'un projet.

4.2.1.2 Transfert intervues de spécifications géométriques

Les travaux initiés par l'ISO TC 213 au début des années 90 ont contribué à développer un langage permettant de définir l'expression univoque des spécifications géométriques pour la conception, la fabrication et la métrologie [Ballu et Mathieu, 95]. Cependant, la problématique de répartition des tolérances entre les diverses opérations d'une gamme de fabrication reste entière. De plus, les spécifications géométriques et les spécifications matériaux d'une pièce vont influencer divers paramètres liés aux procédés mis en œuvre (vitesse de coupe, pression d'injection, température d'injection, ...). Cette influence peut être prise en compte en corrélant ces spécifications en spécifications de gamme de fabrication (cette gamme pouvant être multiprocédé). Plus généralement la corrélation consiste à transférer les spécifications d'une pièce d'une vue conception vers une vue fabrication qui peut être déclinées en plusieurs vues métiers si la gamme comprend plusieurs procédés : ceci correspond à un transfert intervues.

D'une manière analogue, des spécifications géométriques d'une pièce doivent être corrélées en spécifications de gamme de métrologie et des spécifications géométriques de sous-assemblages doivent être corrélées en spécifications de gamme d'assemblage.

Considérons le transfert intervues entre une vue conception et une vue métrologie (voir figure 50). Il s'agit du transfert d'une localisation où, d'un point de vue conception, les axes réels de deux surfaces nominalemeent cylindriques doivent être compris dans un cylindre de diamètre 0,02 mm, et positionné de manière exacte par rapport à un plan extérieur matière (désigné A sur la figure 50).

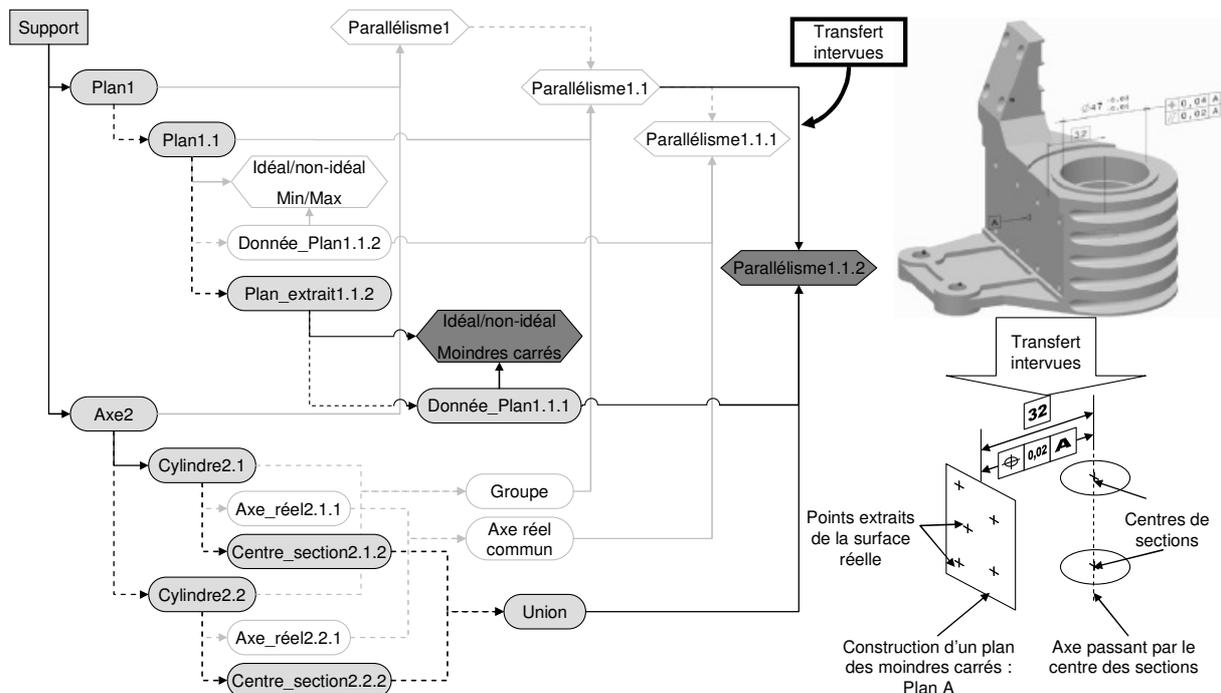


Figure 50 : Transfert intervues de spécifications géométriques entre une vue conception et une vue métrologie d'après [Ballu et al., 07].

D'un point de vue métrologie, cette spécification n'est pas directement exploitable et nécessite d'être corrélée en une autre spécification. Ce transfert est entaché d'incertitudes car les caractéristiques évaluées en métrologie ne sont pas exactement les mêmes que celles spécifiées dans la vue conception [Ballu et al., 07]. Ceci est dû au fait que les outils de métrologie ne permettent pas de donner une définition exacte d'une géométrie réelle. De plus, la détermination de la position de l'axe réel dépend de la méthode employée (axe des moindres carrés passant par un nombre fini de centres de cercles des moindres carrés, axe du cylindre des moindres carrés, etc.). Ou encore, la condition « axes réels inclus dans un cylindre » doit être transformée en conditions sur plusieurs distances.

Le transfert d'une spécification d'une vue métier à une autre n'est souvent possible que par l'expérience et le savoir-faire des experts. En effet, pas ou peu d'outils existent pour réaliser cette opération. Les outils sont essentiellement cantonnés aux calculs des valeurs numériques associées aux spécifications mises en place.

Les concepts manipulés dans les mécanismes de transferts des spécifications géométriques peuvent s'appliquer à l'ensemble des spécifications projet ainsi qu'à l'ensemble des métiers de l'entreprise.

4.2.2 Formalisation des mécanismes de transferts

Les paragraphes précédents ont montré que, dans le cycle de conception, une spécification géométrique d'un niveau de détail donné du produit, est déployable dans les niveaux de détail inférieurs par un mécanisme de transferts interniveaux. De plus, ces spécifications géométriques sont également exploitées par plusieurs expertises métier. Ces expertises sont autant de vues particulières sur le produit. Le passage d'une vue à une autre est défini par un mécanisme de transferts intervues.

Nous proposons d'étendre les mécanismes de transferts interniveaux et intervues aux spécifications projet dans un environnement de conception collaborative de type PPO. L'environnement PPO retenu pour illustrer nos propos est celui présenté dans le chapitre 3.

4.2.2.1 Transfert interniveaux

Soit $O_{i,n,v}$, un objet i défini à un niveau de détail n , dans une vue donnée v . Au niveau de détail $n+1$, l'objet $O_{i,n,v}$ se décompose en k objets fils $O_{j,n+1,v}$, avec $1 \leq j \leq k$: voir figure 51.

Le transfert de spécifications interniveaux consiste à définir les spécifications des k objets fils $O_{j,n+1,v}$ qui garantissent le respect des spécifications de l'objet père $O_{i,n,v}$.

Ce type de transfert nécessite la connaissance :

- des spécifications de l'objet père $O_{i,n,v}$,
- des liens de descendance de l'objet père $O_{i,n,v}$ vers les k objets fils $O_{j,n+1,v}$,
- des relations d'influence entre les k objets fils $O_{j,n+1,v}$.

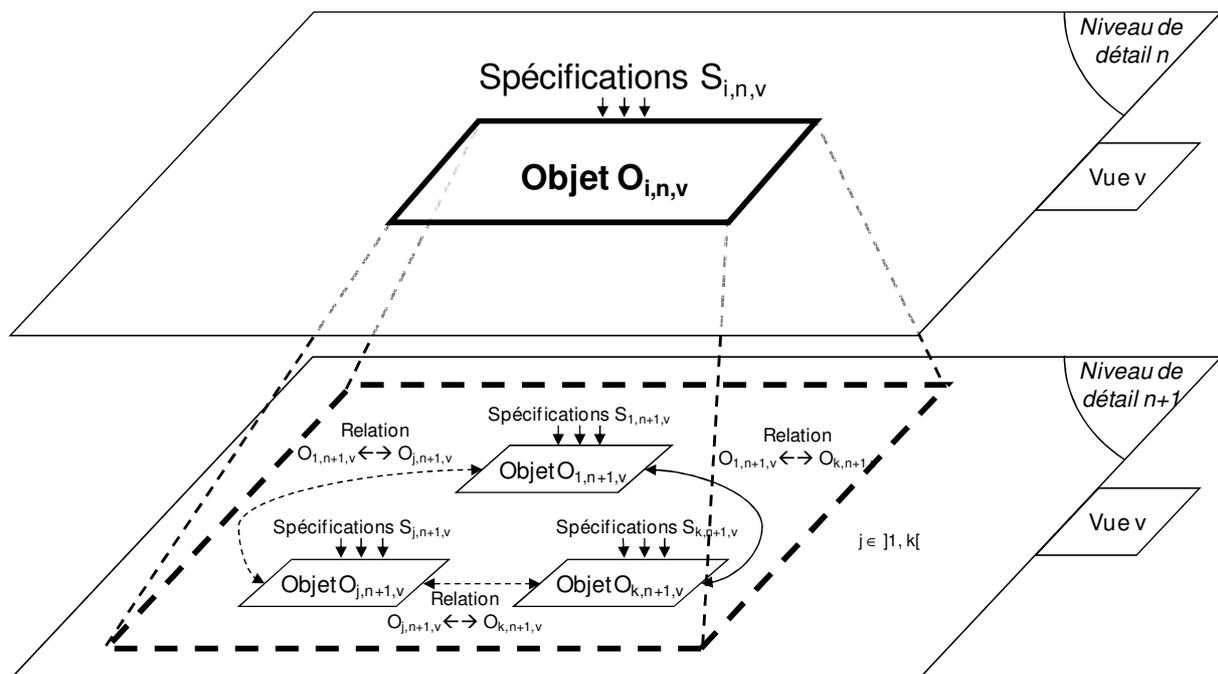


Figure 51 : Lien entre objet père et fils et relations entre objets fils.

La figure 52 représente le transfert de spécifications interniveaux en utilisant le formalisme de IDEFØ décrivant les données manipulées dans un transfert de spécifications interniveaux.

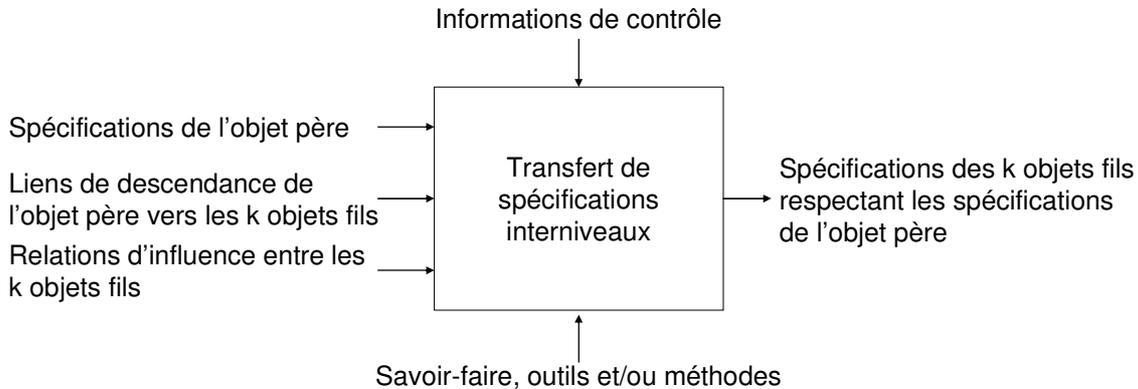


Figure 52 : Transfert de spécifications interniveaux

Souvent, la méconnaissance de la variabilité des caractéristiques des objets fils $O_{j,n+1,v}$ et la modélisation de leurs relations d'influence entraînent des incertitudes dans le transfert de spécifications interniveaux.

Les spécifications des k objets fils $O_{j,n+1,v}$ sont déterminées soit à l'aide d'outils analytiques déterministes et/ou stochastiques soit d'après l'expérience et le savoir-faire des acteurs de l'entreprise.

Dans le domaine du produit, les objets ($O_{i,n,v}, O_{j,n+1,v}$) peuvent être :

- le produit lui-même,
- des assemblages,
- des sous-assemblages,
- des pièces.

Les spécifications sont alors des spécifications produit (spécifications géométriques, spécifications matériaux, spécifications de masse, ...) [Mouton, 10].

Dans le domaine du processus, les objets ($O_{i,n,v}, O_{j,n+1,v}$) peuvent être :

- des processus,
- des sous-processus,
- des activités élémentaires.

Les spécifications sont alors des conditions sur des délais, des affectations de ressources, des objectifs, des contraintes, des critères, etc. Dans les réseaux GRAI et GRAI R&D, ces spécifications peuvent être regroupées dans un cadre de conception.

Généralement, les liens de descendance sont, dans les domaines produit et processus, des liens de décompositions hiérarchiques.

Dans le domaine de l'organisation, et plus particulièrement dans le cadre de la modélisation GRAI, les objets ($O_{i,n,v}, O_{j,n+1,v}$) sont des centres de décision. L'objet père

$O_{i,n,v}$ est un centre émetteur et l'objet fils $O_{j,n+1,v}$ est un centre récepteur. Les spécifications sont caractérisées par des objectifs, des contraintes, etc. Dans le cadre de la modélisation GRAI, ces spécifications sont regroupées dans des cadres de décision. Les niveaux de détail correspondent aux niveaux décisionnels de l'entreprise (stratégique, tactique ou opérationnel).

La description complète des éléments du transfert interniveaux en fonction des aspects produit, processus et organisation sera développée dans le paragraphe 4.3.

4.2.2.2 Transfert intervues

Soit $O_{i,n,v}$, un objet i défini à un niveau de détail n , dans une vue donnée v . Soit S_{i,n,v_g} les spécifications de l'objet O_{i,n,v_g} dans une vue globale v_g (figure 53) et S_{i,n,v_p} les spécifications de l'objet O_{i,n,v_p} dans les m vues particulières v_p , avec $1 \leq p \leq m$ (figure 54). La vue globale peut être définie comme une vue de référence vis-à-vis des autres vues, c'est-à-dire qu'elle contient les informations nécessaires à la corrélation des informations vers les m vues particulières. **Une vue particulière peut donc être une vue globale lorsque cette vue permet d'effectuer à son tour un transfert intervues.**

Le transfert de spécifications intervues consiste à définir les spécifications S_{i,n,v_p} des vues particulières par des corrélations des spécifications S_{i,n,v_g} d'une vue globale de l'objet O_{i,n,v_g} .

Le transfert intervues réalise une corrélation des spécifications S_{i,n,v_g} d'une vue globale v_g vers les différentes vues particulières v_p . La figure 53 et la figure 54 ne permettent pas de montrer les différences d'un objet dans plusieurs vues. Ces différences peuvent être visualisées en montrant le niveau de détail $n+1$ de l'objet : voir figure 55. Cette même figure indique que les experts ne travaillent pas forcément sur les mêmes éléments et que les spécifications qu'ils manipulent sont dépendantes de leur vue métier. La vue globale regroupe l'ensemble des spécifications sur l'ensemble des objets sur lesquels ont travaillé la totalité des expertises.

Ce type de transfert nécessite la connaissance :

- des spécifications de l'objet O_{i,n,v_g} ,
- de la définition des m vues v_p ,
- des relations entre la vue globale v_g et les m vues v_p .

Les relations entre les vues sont sources d'incertitudes. Ces incertitudes rendent la corrélation des spécifications complexe.

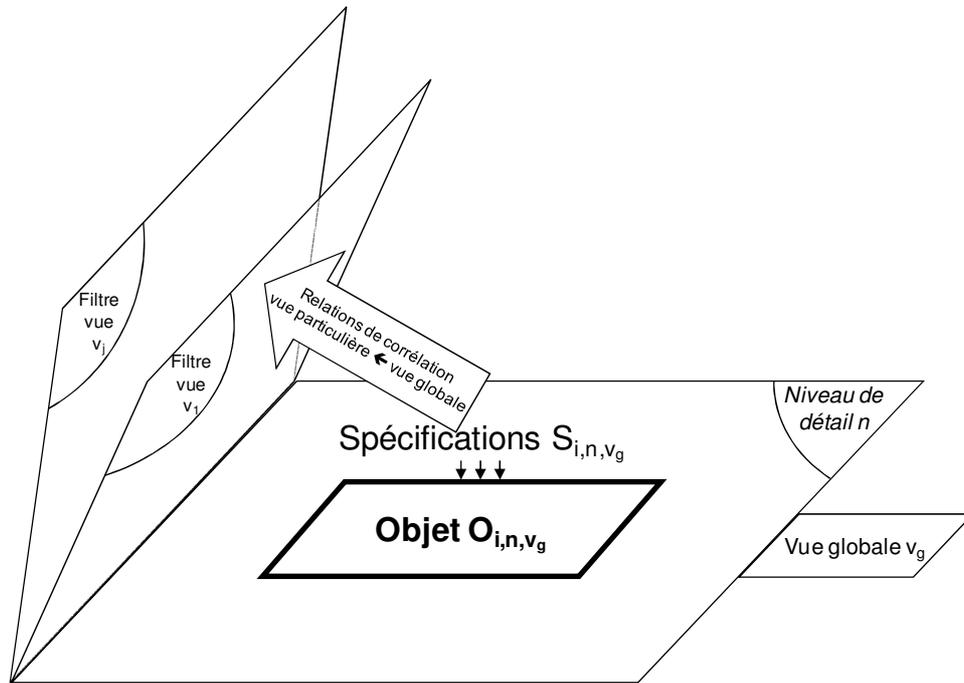


Figure 53 : Représentation d'un objet dans une vue globale et relations de corrélation vers les autres vues.

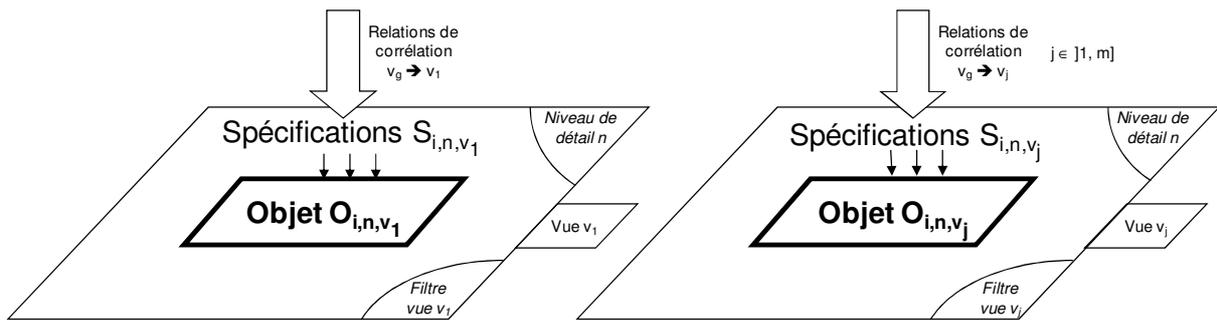


Figure 54 : Représentation multivue d'un objet.

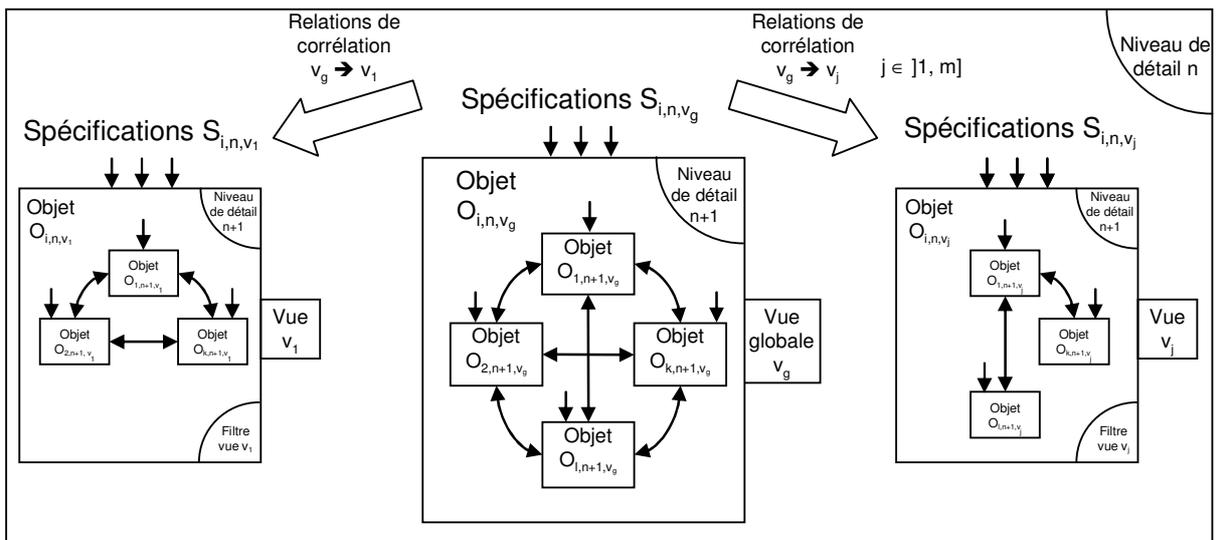


Figure 55 : Illustration des différences entre les vues au niveau de détail $n+1$.

La figure 56 représente le transfert de spécifications intervenues en utilisant le formalisme de IDEFØ.

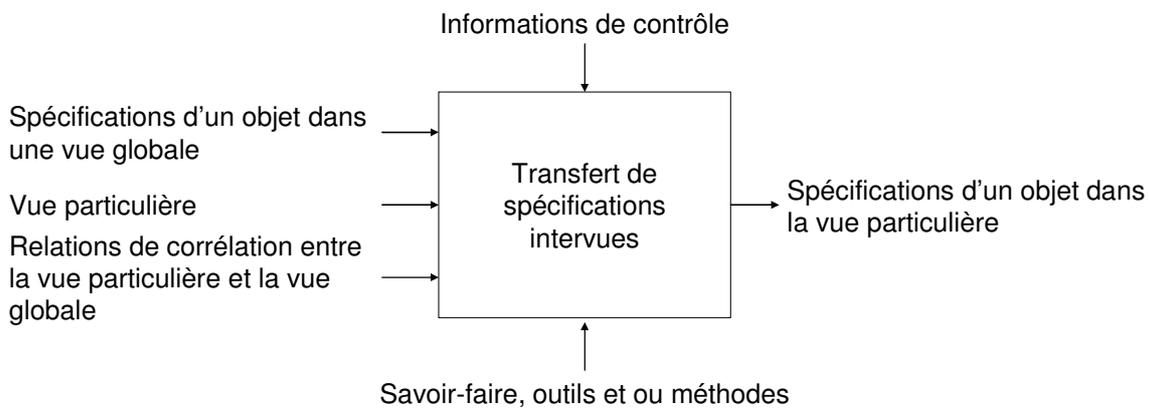


Figure 56 : Transfert de spécifications interniveaux

A priori, la notion de vue dans un processus n'existe pas. Dans ce cas particulier, les mécanismes de transferts intervenues ne s'appliquent pas.

Dans le domaine du produit, les spécifications S_{i,n,v_p} sont des spécifications produit dans une vue particulière. Les vues sont définies par les différentes expertises métiers.

Dans le domaine de l'organisation, les spécifications sont caractérisées par exemple par des objectifs, des ressources. Les vues, quant à elles, sont les différentes fonctions décisionnelles de l'entreprise.

Dans le modèle de référence GRAI, le système décisionnel et le système technologique peuvent être considérés comme des vues différentes du système de conception. Le système décisionnel pilote le système technologique par l'intermédiaire de cadres de conception. Les spécifications incluses dans ces cadres de conception sont obtenues par corrélation. Plus précisément, les spécifications globales de type PPO sont traduites en spécifications liées au produit et en spécifications liées au processus de conception.

La description complète des éléments du transfert intervenues en fonction de l'aspect produit, processus et organisation fera l'objet d'un développement dans le paragraphe 4.3.

4.2.3 Problématique de l'agrégation des spécifications

L'estimation d'une spécification globale de type PPO (i.e. projet) passe par l'agrégation de spécifications locales (voir figure 44). Cette agrégation n'est pas triviale et est de plus sujette à plusieurs sources d'incertitudes :

- les modèles idéalisant les comportements, que ce soit ceux du produit ou ceux des ressources mais aussi leurs relations, et les spécifications locales sont entachées d'incertitudes qui peuvent se cumuler lors du processus d'agrégation,
- l'agrégation se produisant à des moments précis du développement du produit (jalons), certaines spécifications locales peuvent être incomplètes ou manquantes au moment où l'agrégation est réalisée.

Les mécanismes de transferts de spécifications peuvent servir de support pour aider à l'agrégation puisqu'ils permettent de conserver la traçabilité des spécifications. Néanmoins, le processus d'agrégation dépend de facteurs propres à l'entreprise et au produit (Key Characteristics [Thornton, 03], facteurs de pondération, ...).

4.3 Déploiement des transferts de spécifications dans un environnement PPO

Ce paragraphe présente comment nos propositions de formalisation du transfert de spécifications projet peuvent être appliquées à un environnement PPO particulier. Le vocabulaire employé par les deux formalismes de transfert (i.e. les objets, les spécifications, les relations, les niveaux et les vues) sera transposé en fonction des modèles retenus. Les transferts de spécifications sont présents :

- dans le système décisionnel,
- entre le système décisionnel et le système technologique,
- dans le système technologique.

4.3.1 Description du transfert dans le système décisionnel

Dans le système décisionnel, les transferts de spécifications sont décrits à l'aide des grilles GRAI R&D et des réseaux GRAI. Ces transferts sont intimement liés car ils manipulent les mêmes informations avec des nuances dans leurs fonctionnements respectifs.

4.3.1.1 Mise en œuvre dans la structure GRAI R&D

Les transferts de spécifications dans la structure GRAI R&D peuvent être de type interniveaux, intervues ou simultanément des deux types.

Transferts interniveaux

Le transfert interniveaux consiste en la transformation d'un cadre de décision en un autre cadre de décision plus détaillé : voir figure 57.

Les entités objets sont des centres de décisions. Les niveaux de détail correspondent aux niveaux décisionnels de l'entreprise (cf. paragraphe 4.2.2.1).

Les cadres de décision sont nommés, dans la figure 57, FdD (F pour *Framework*, cadre en anglais) pour ne pas confondre avec les centres de décision CdD.

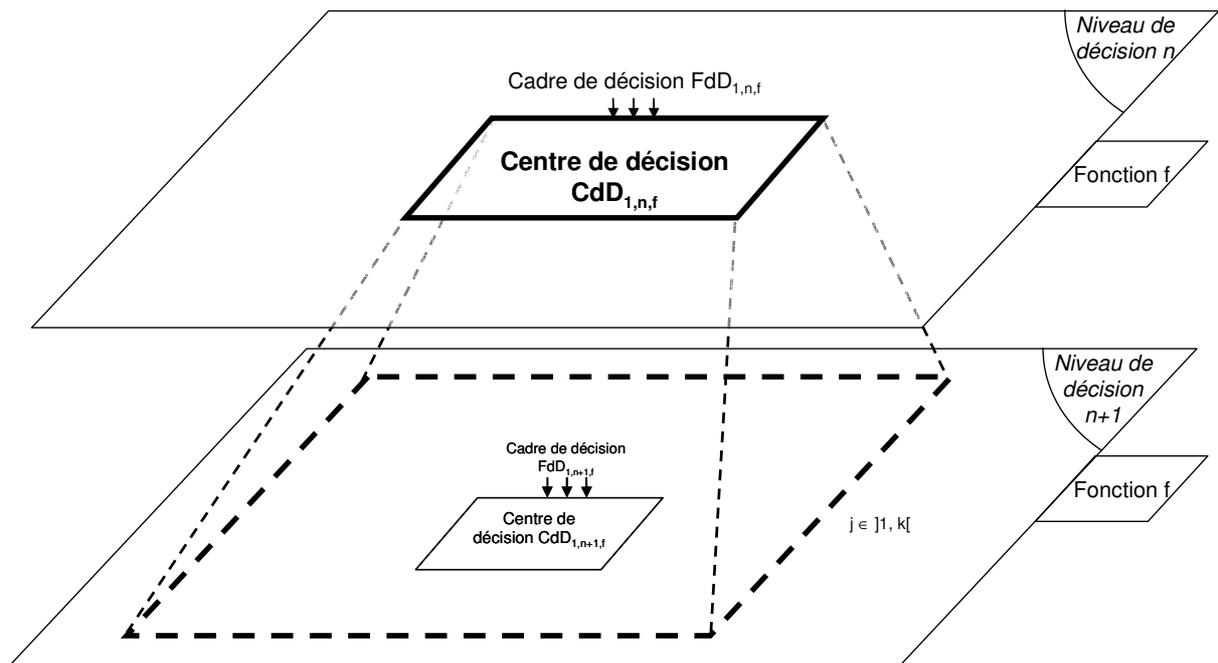


Figure 57 : Formalisme du transfert interniveaux appliqué aux grilles GRAI R&D.

Transferts intervues

Le transfert intervues consiste en la transformation d'un cadre de décision d'une fonction donnée (considérée comme une vue globale) en un autre cadre de décision dans une ou plusieurs autres fonctions décisionnelles (considérées comme des vues particulières) : voir figure 58.

Comme développé dans le paragraphe 4.2.2.2, lorsqu'un centre de décision reçoit un cadre de décision, sa vue (i.e. sa fonction) devient alors une vue globale (i.e. une fonction « globale ») vis-à-vis des autres centres de décisions auxquels il envoie des cadres de décision.

Les relations de corrélation entre les différents centres de décision permettent d'effectuer le transfert de spécifications intervues : les vues correspondant aux différentes fonctions décisionnelles. La figure 59 représente la correspondance entre les entités du formalisme du transfert de spécifications et le formalisme de la structure GRAI R&D.

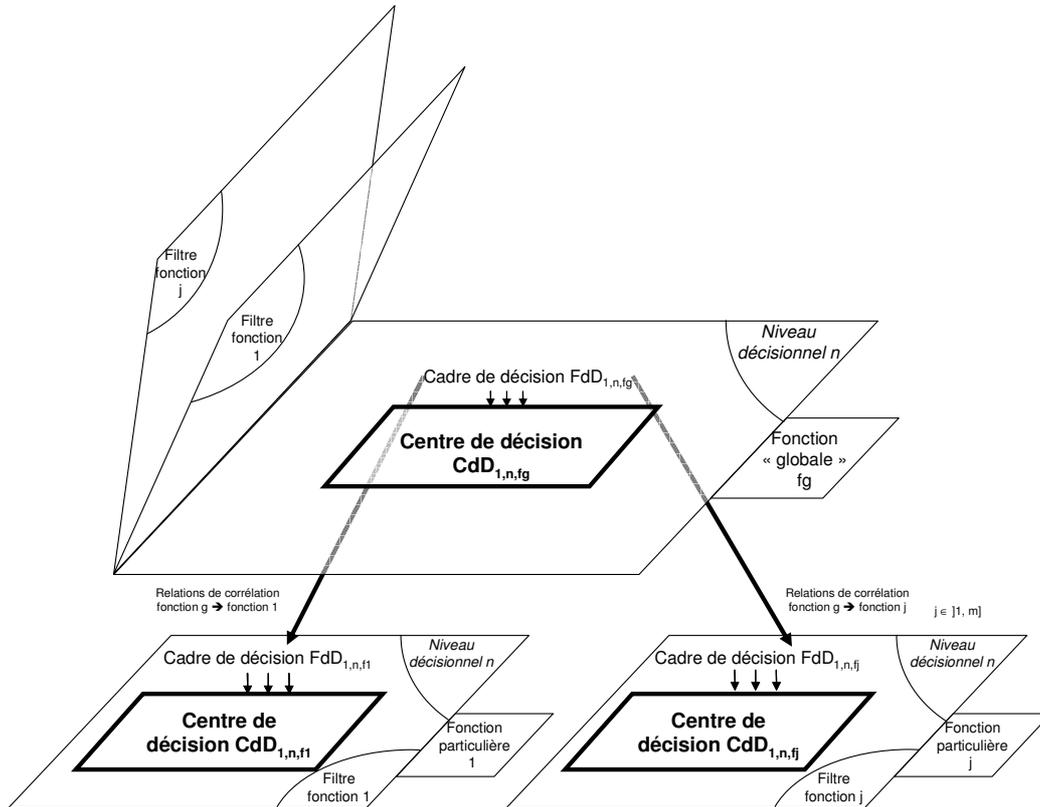


Figure 58 : Formalisme du transfert interviews appliqué aux grilles GRAI R&D.

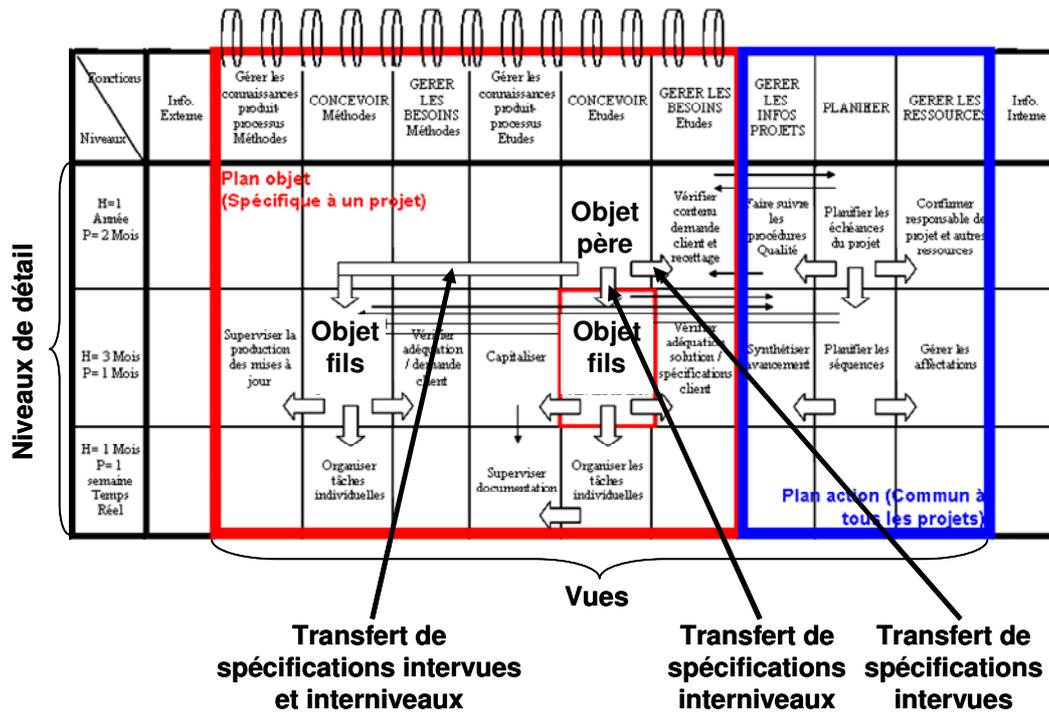


Figure 59 : Correspondance entre les entités du transfert interniveaux/intervees et une grille GRAI R&D.

Transferts interniveaux et intervues simultanés

Dans une grille GRAI R&D, le transfert de spécifications peut avoir lieu simultanément d'une fonction vers une autre et sur différents niveaux décisionnels : voir figure 59.

4.3.1.2 Mise en œuvre dans les réseaux GRAI

Au sein d'un centre de décision se déroule un processus, appelé processus de décision (à ne pas confondre avec l'activité de décision), dont la modélisation est assurée par les réseaux GRAI.

Comme expliqué dans le paragraphe 4.2.2.2, le transfert de spécifications intervues, avec les réseaux GRAI et GRAI R&D, n'a *a priori* pas de sens pour un processus.

Le transfert interniveaux dans un processus de décision consiste en l'affectation d'informations (objectifs, contraintes, ressources, etc.) aux activités (i.e. aux sous-processus) constituant ce processus : voir figure 60.

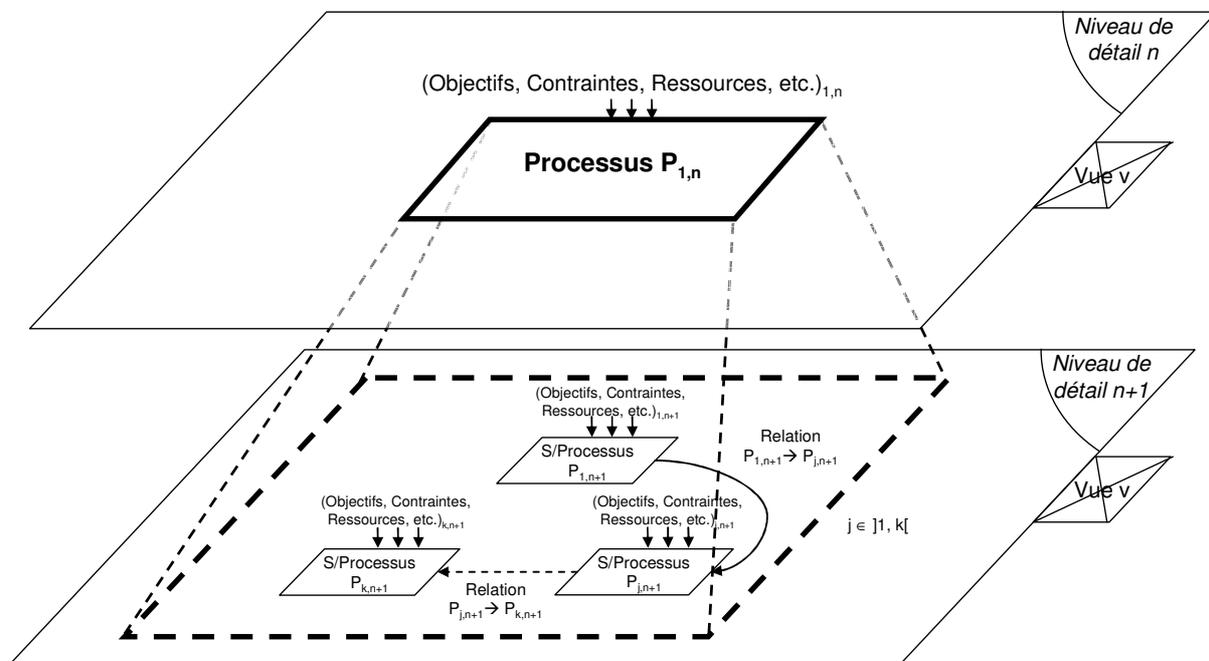


Figure 60 : Formalisme du transfert interniveaux appliqué aux réseaux GRAI.

Les objets sont des processus, des sous-processus ou des activités élémentaires. Les niveaux de détail correspondent aux niveaux de décomposition du processus. Une des particularités de ce transfert est que les relations entre les objets (ici les activités) sont orientées, c'est-à-dire qu'une activité nécessite de connaître les informations provenant de l'activité précédente (en particulier la fin de son déroulement). Les spécifications sont des informations constituées d'objectifs, de critères, de contraintes, de variables de décision et de ressources.

La figure 61 représente les correspondances entre le formalisme du transfert de spécifications proposé et un processus de décision modélisé par les réseaux GRAI.

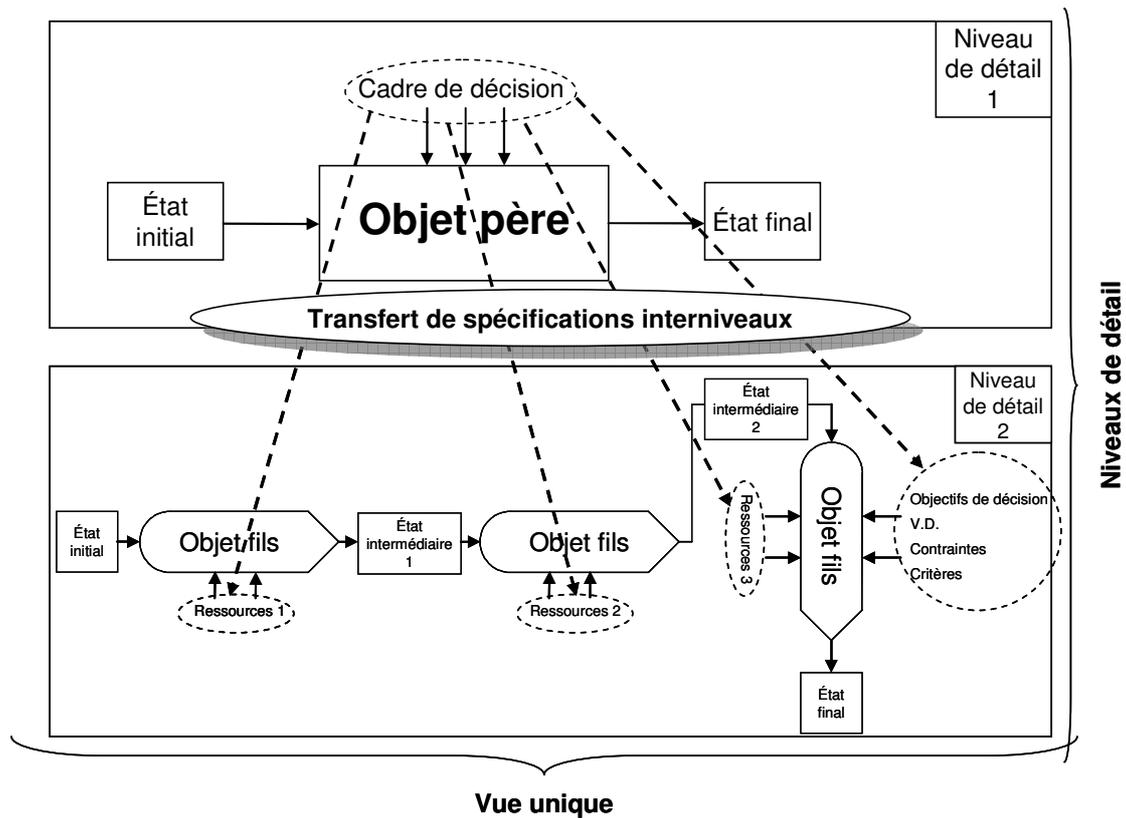


Figure 61 : Correspondance entre les entités du transfert interniveaux et les réseaux GRAI.

4.3.2 Description du transfert entre le système décisionnel et le système technologique

Le travail d'un centre de décision est de détailler (notion de décomposition) et de corréler les informations reçues d'un cadre de décision afin de les envoyer, à un ou plusieurs centres de décision mais aussi à un ou plusieurs centres de conception. Dans ce deuxième cas, il y a transfert de spécifications du système décisionnel vers le système technologique.

Le système décisionnel et le système technologique constituent deux vues différentes du système de conception. Des échanges ont lieu entre ces deux systèmes : le système décisionnel envoie, par l'intermédiaire des centres de décision, des cadres de conception au système technologique constitués de centres de conception. Des informations sur l'état d'avancement du projet (et donc du produit) sont alors envoyées en retour.

Transfert de spécifications dans le modèle de référence GRAI R&D

L'élaboration d'un cadre de conception répond à la définition du transfert intervenus tel que nous l'avons défini : voir figure 62.

Les particularités de ce transfert sont :

- il n'y a que deux vues, la vue système décisionnel (v_{sd}) et la vue système technologique (v_{st}), la vue globale étant celle du système décisionnel,
- la notion de niveau de détail, telle que nous l'avons défini jusqu'à présent, n'a pas de sens dans le formalisme GRAI pour les centres de conception. La décomposition des centres de conception est indirecte ; elle peut être formalisée avec les mécanismes de

transferts interniveaux provenant de la décomposition des centres de décision, présentés dans le paragraphe 4.3.1.1.

Les cadres de conception sont nommés, dans la figure 62, FdC (F pour *Framework*, cadre en anglais) pour ne pas confondre avec les centres de conception nommés CdC.

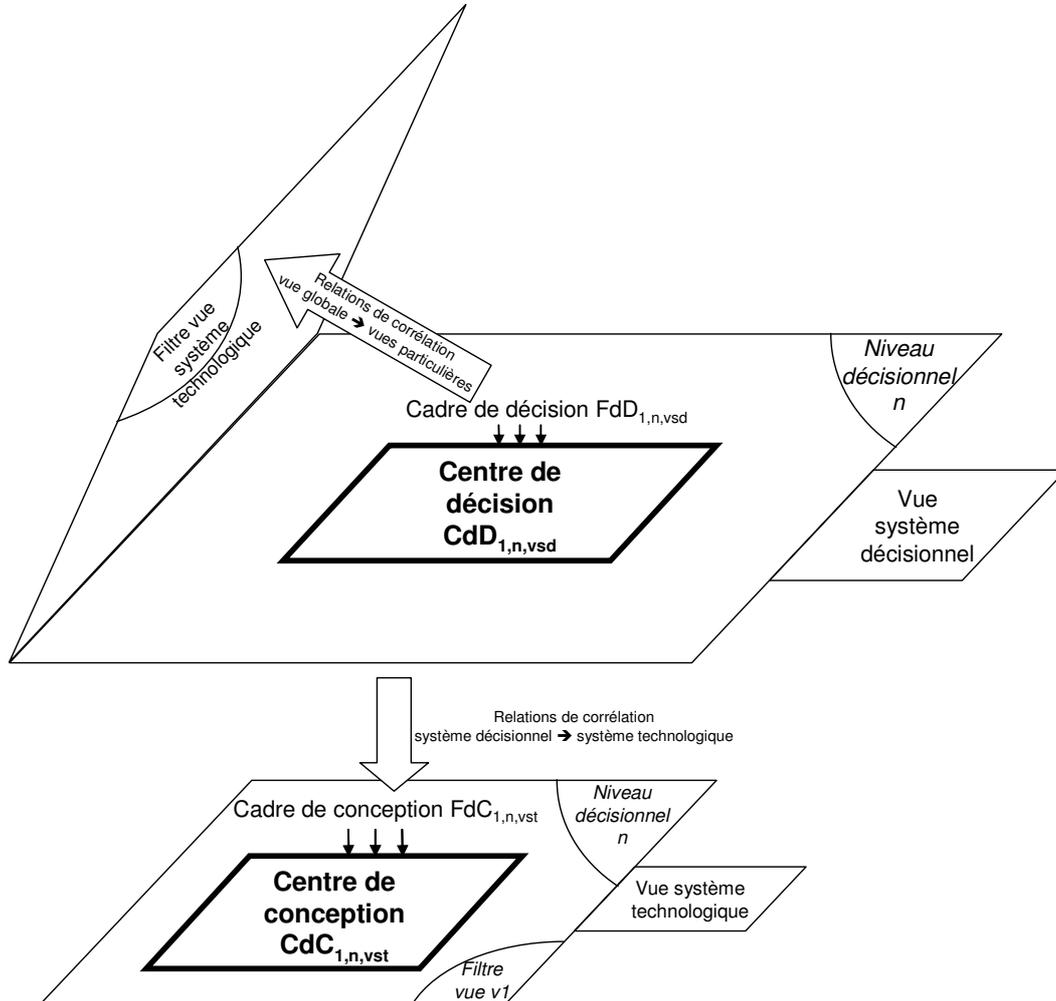


Figure 62 : Formalisme du transfert intervues appliqué au passage du système décisionnel vers le système technologique.

4.3.3 Description du transfert dans le système technologique

Dans le système technologique, les transferts de spécifications ont lieu dans le modèle produit issu d'IPPOP et dans les réseaux GRAI R&D. Les deux modèles sont liés : les états initiaux et finaux des activités sont constitués des états du modèle produit.

4.3.3.1 Mise en œuvre dans le modèle produit issu d'IPPOP

Le transfert de spécifications dans le modèle produit PPO est directement issu des travaux de recherche sur le transfert de spécifications géométriques [Dufaure et Teissandier, 08]. Ces travaux ont servi de base à la formalisation des transferts de

spécifications proposée. Ce paragraphe permet de présenter nos propositions de généralisation des transferts dans le modèle produit.

Transferts interniveaux

Le transfert interniveaux consiste en la détermination des spécifications des objets fils lors de la décomposition d'un objet père : voir figure 63.

Dans le modèle produit, les objets pouvant être décomposables sont le produit ou tout sous-ensemble du produit jusqu'aux pièces.

La figure 63 présente le transfert interniveaux des spécifications d'un mécanisme (ici une turbine haute pression). La décomposition du mécanisme peut avoir lieu dans toutes les vues du modèle produit (i.e. globale ou particulières).

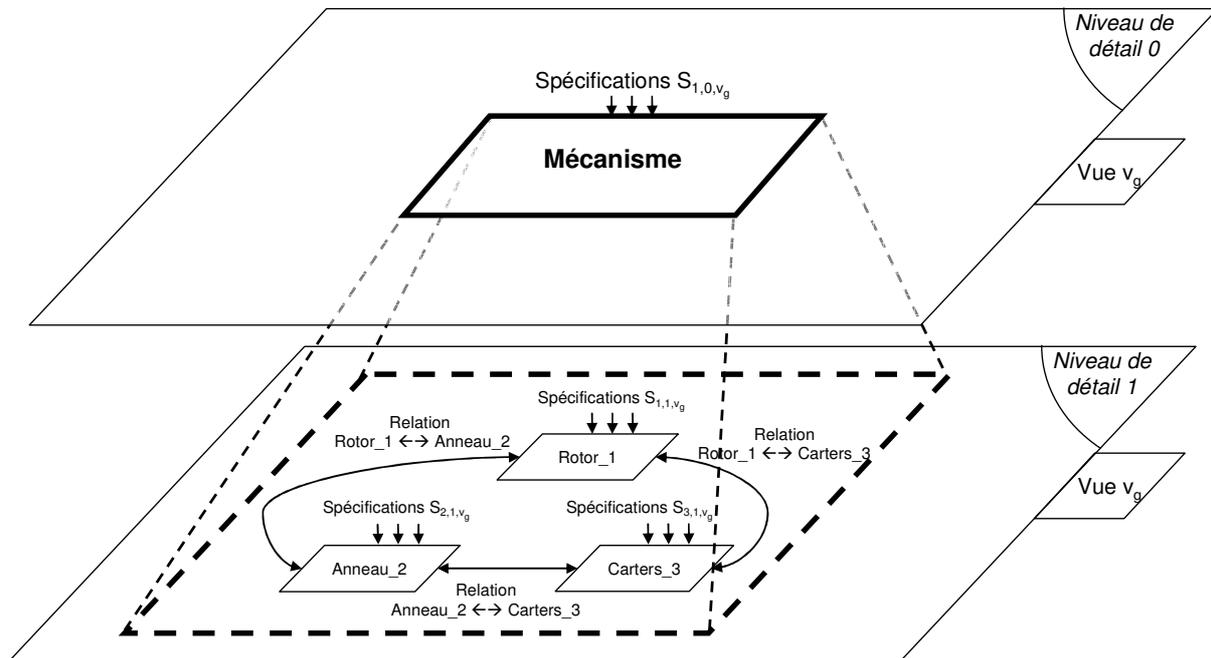


Figure 63 : Formalisme du transfert interniveaux appliqué au modèle produit PPO.

Il est possible d'illustrer la correspondance entre les éléments du modèle produit et le formalisme du transfert de spécifications proposé : voir figure 64.

La décomposition des objets est directement visible dans le modèle produit. Les objets sont les composants et leurs interfaces. Les spécifications et les relations sont définies par les entités fonctions.

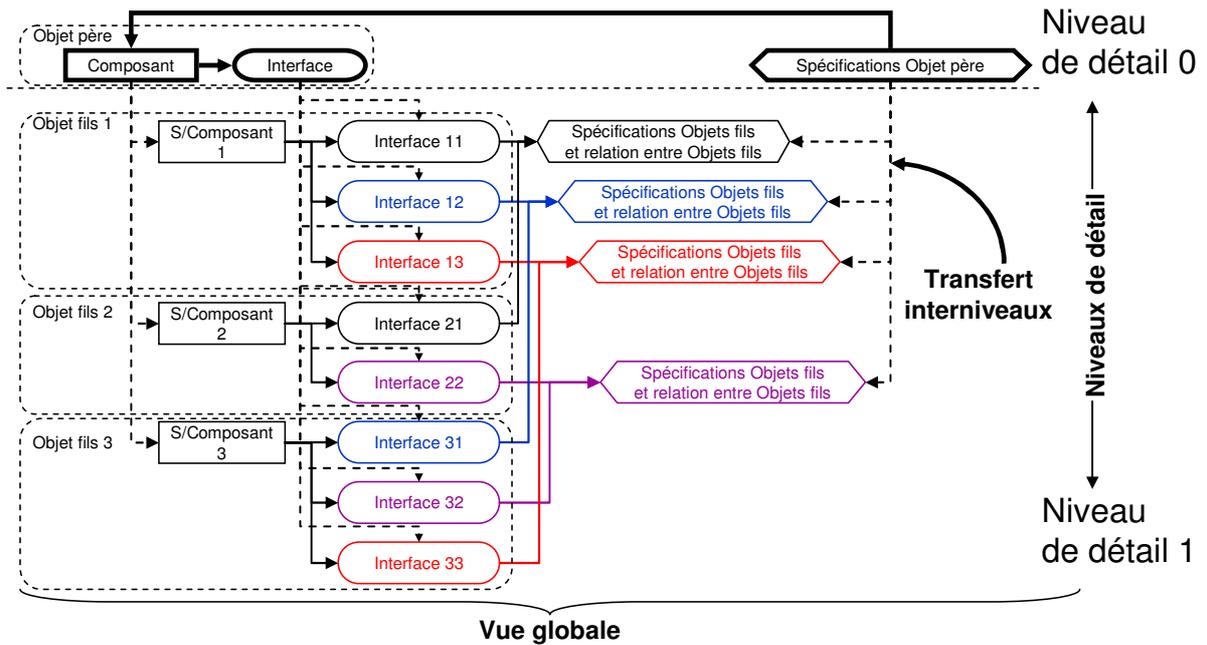


Figure 64 : Correspondance entre les entités du transfert interniveaux et le modèle produit IPPOP pour les composants.

Transferts intervues

Le transfert intervues consiste en la transformation de spécifications d'une vue globale vers des vues particulières. La figure 65 illustre un transfert intervues d'une fonction de service.

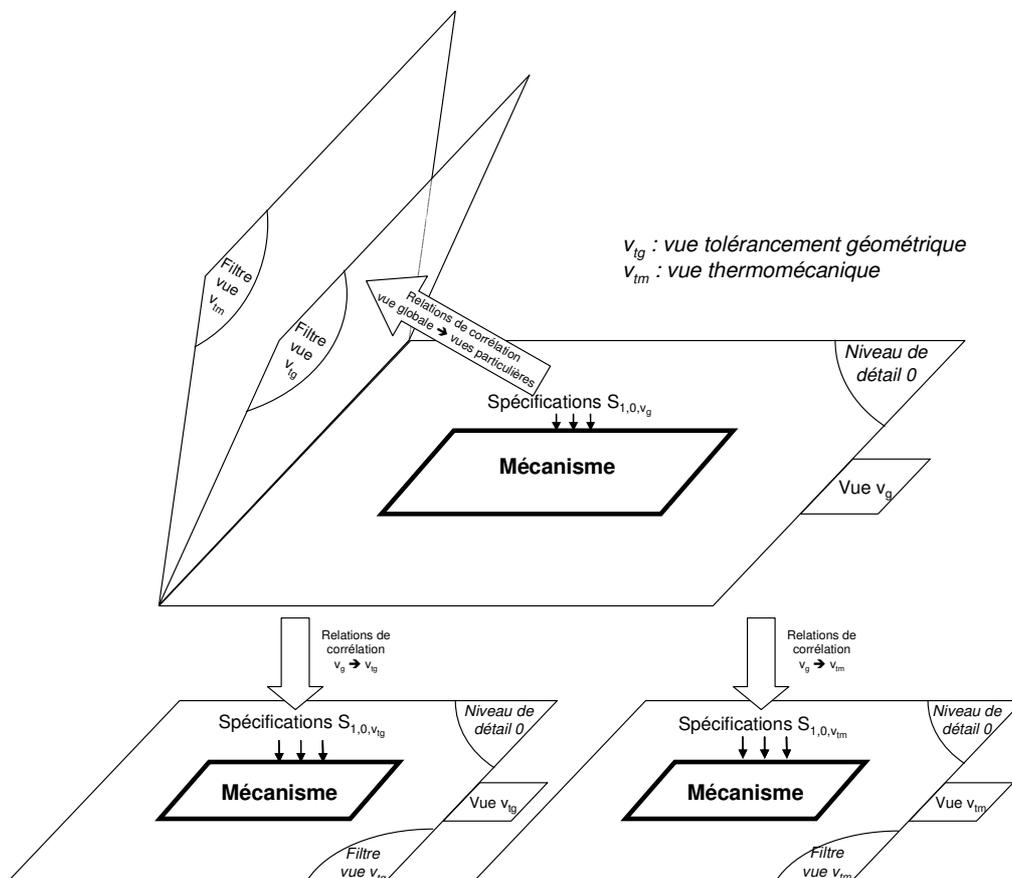


Figure 65 : Formalisme du transfert intervues appliqué au modèle produit.

Le transfert intervenues, dans le modèle produit, est rapidement exploitable. Les objets sont les composants du produit. Les vues correspondent aux expertises métiers disponibles dans l'entreprise.

La vue globale est une vue qui regroupe toutes les autres vues. Cette vue globale n'est *a priori* visible par aucune expertise métier qui utilise un « filtre » pour pouvoir utiliser le modèle produit. Concrètement chaque acteur utilise les outils qui lui sont propres et les informations manipulées sont gérées par le modèle produit. Ainsi, les experts n'ont, à leur disposition, que les informations strictement nécessaires à leur activité et ne complètent le modèle produit qu'indirectement grâce aux outils qu'ils exploitent. Le passage de l'outil métier au modèle produit ainsi que la gestion des données partagées est une problématique en soi [Sadeghi, 08], [Chettaoui, 08], non abordée dans ce mémoire. Ceci ne sera pas sans poser problème lors d'une éventuelle transposition de l'environnement PPO présenté en une plateforme logicielle servant de démonstrateur.

Au niveau du modèle produit, ceci se traduit par l'utilisation d'entités qualifiées de « vue ». La figure 66 illustre le transfert de spécifications intervenues. Une spécification dans une vue globale est corrélée en autant de spécifications qu'il y a de vues particulières impactées par cette spécification. Concrètement, les experts n'ont accès qu'à la spécification dans leur vue métier.

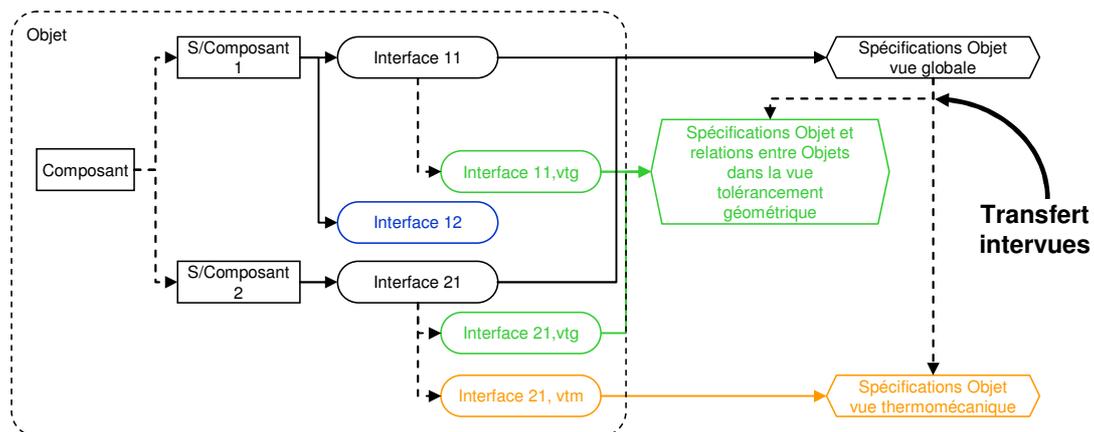


Figure 66 : Correspondance entre les entités du transfert intervenues et le modèle produit.

4.3.3.2 Mise en œuvre dans les réseaux GRAI R&D

Dans chaque centre de conception a lieu un processus, appelé processus de conception (à ne pas confondre avec l'activité de conception), dont la représentation est assurée par les réseaux GRAI R&D.

Tout comme dans les réseaux GRAI dont ils sont issus, le transfert de spécifications dans les réseaux GRAI R&D ne peut être de type interneaux.

Les objets sont des processus de conception, des sous-processus de conception ou des activités élémentaires. Les niveaux de détail correspondent aux niveaux de décomposition du processus de conception. Les relations entre les processus, sous-processus ou activités élémentaires sont des liens orientés. Les spécifications sont des informations constituées d'objectifs de conception, de contraintes de conception, de critères, de contraintes (de décision), d'objectif (de décision), de variables de décision et de ressources (humaines, matérielles et informationnelles).

Le transfert interniveaux dans un processus de conception consiste en l'affectation de spécifications vers les sous-processus (voir figure 67). Les spécifications sont de même type que celles transférées dans les processus de décision (cf. paragraphe 4.3.1.2) si ce n'est les objectifs et les contraintes de conception affectés aux activités de conception, activités spécifiques aux réseaux GRAI R&D.

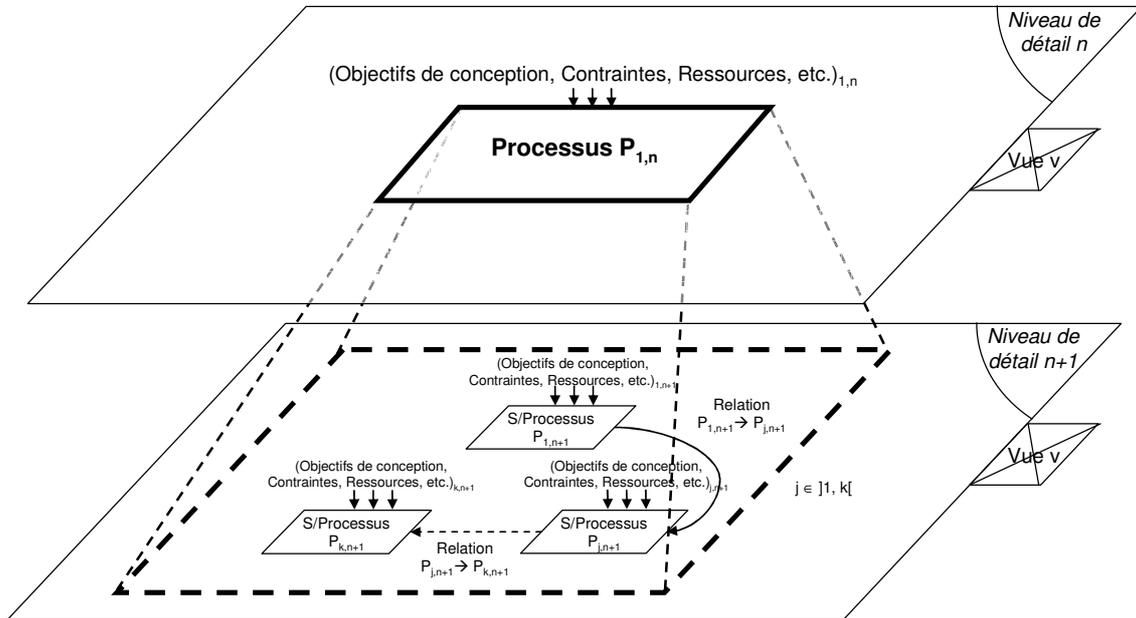


Figure 67 : Formalisme du transfert interniveaux appliqué aux réseaux GRAI R&D.

Les correspondances entre le formalisme du transfert de spécifications et un processus de conception modélisé par les réseaux GRAI R&D (voir figure 68) sont semblables à celles présentées dans la figure 61, seuls les transferts vers des activités de conception sont ajoutés.

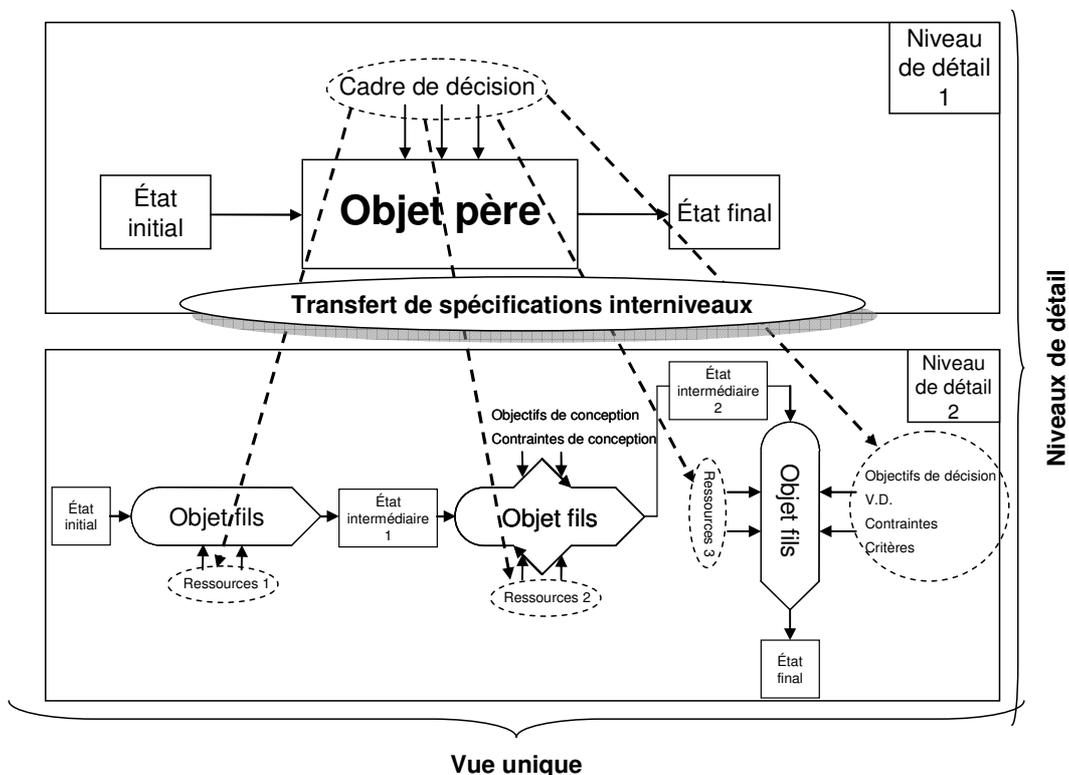


Figure 68 : Correspondance entre les entités du transfert interniveaux et les réseaux GRAI R&D.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté la démarche qui a permis de généraliser et de formaliser les transferts de spécifications géométriques aux spécifications projet.

La première partie a posé les définitions des spécifications manipulées au cours du cycle de conception qu'elles soient issues du produit ou plus généralement du projet. Une deuxième partie a défini les deux types de transferts (interniveaux et intervues) de manière générique en procédant par analogie avec les transferts de spécifications géométriques. Le postulat de départ étant que ces mécanismes de transferts sont déployables sur l'ensemble des spécifications projet. Ainsi, le transfert de spécifications géométriques a été généralisé et formalisé. Enfin, la dernière partie se concentrait sur la correspondance entre nos propositions d'une part et un environnement PPO particulier, en partie issu d'IPPOP, d'autre part.

Le chapitre suivant illustre nos propositions en s'appuyant sur un exemple tiré d'un scénario de conception de turbine haute pression. L'objectif sera de mettre en évidence les transferts de spécifications garantissent la traçabilité des spécifications. Cette traçabilité doit permettre une utilisation plus efficace des indicateurs de performance projet. Ces indicateurs peuvent s'appuyer sur des données issues du produit, des processus et de l'organisation, la gestion de ces données étant réalisée dans un environnement de travail collaboratif de type PPO.

Les transferts de spécifications interniveaux et intervues ont été définis de manière suffisamment générique pour être transposables à toutes spécifications projet. Les transferts opérant dans chaque modèle et entre les modèles de l'environnement PPO retenu dans nos travaux sont décrits dans un formalisme unique. Le transfert interniveaux permet de définir les spécifications d'objets obtenus par décomposition d'un niveau de détail donné vers un niveau de détail plus élevé. Le transfert intervues permet de définir les spécifications d'objets d'une vue globale dans des vues particulières. Une application à un scénario de conception de turbine haute pression dans le chapitre suivant va permettre d'illustrer ces mécanismes de transferts assurant la traçabilité des spécifications projet.

Chapitre 5 Transfert de spécifications dans un scénario de conception de turbine haute pression

Le chapitre précédent a présenté une proposition de formalisme associée aux mécanismes de transferts de spécifications dans un environnement particulier de conception collaboratif de type PPO. Ces modèles supportant *a priori* la traçabilité des spécifications, il reste à appliquer nos propositions sur un exemple qui sera inspiré de la conception d'une turbine haute pression pour montrer la faisabilité de l'exploitation de nos propositions.

Le scénario de conception retenu se déroule, dans le cycle de conception, en phase de conception architecturale : voir figure 69. Cette figure présente schématiquement les différentes activités du processus de conception en fonction du niveau de détail du produit. Nous nous plaçons dans un contexte d'ingénierie concurrente où, par exemple, le bureau des méthodes commencent ses activités dès que les premiers éléments de conception, fournis par le bureau d'études, sont disponibles. En phase de conception architecturale, la définition du produit est suffisante pour illustrer l'ensemble des transferts interniveaux et intervues.

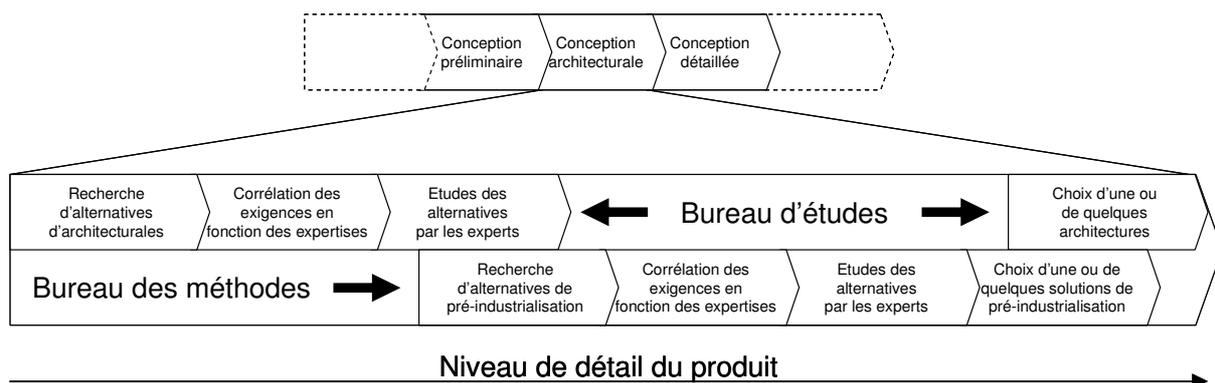


Figure 69 : Description schématique du déroulement du scénario de conception (décomposition des phases de conception inspirée de [Pahl et Beitz, 96]).

Ce chapitre présente, dans une première partie, la description complète du scénario à l'aide de la modélisation présentée dans le chapitre 3. Ainsi, seront présentés successivement :

- les états d'évolution du modèle produit,
- les processus de conception puis de décision,
- l'organisation de l'entreprise, au travers ses fonctions et ses niveaux décisionnels.

Dans une deuxième partie, des perturbations seront simulées. Ces perturbations apparaissent lorsqu'un objectif n'est pas atteint et génèrent un désordre (i.e. un problème) dans le cycle de conception. Elles permettront d'illustrer l'utilisation des liens de traçabilité des spécifications produit, processus et organisation au travers la formalisation des mécanismes de transferts de spécifications. Trois types de perturbations pertinentes dans le système technologique seront envisagées (figure 70) :

- perturbation de type technique (i.e. liée intrinsèquement au produit) dans le bureau d'études puis dans le bureau des méthodes,
- perturbation de type processus dans le processus de conception du bureau d'études,
- perturbation organisationnelle, plus précisément, liée à un problème de ressources dans le processus de conception du bureau d'études.

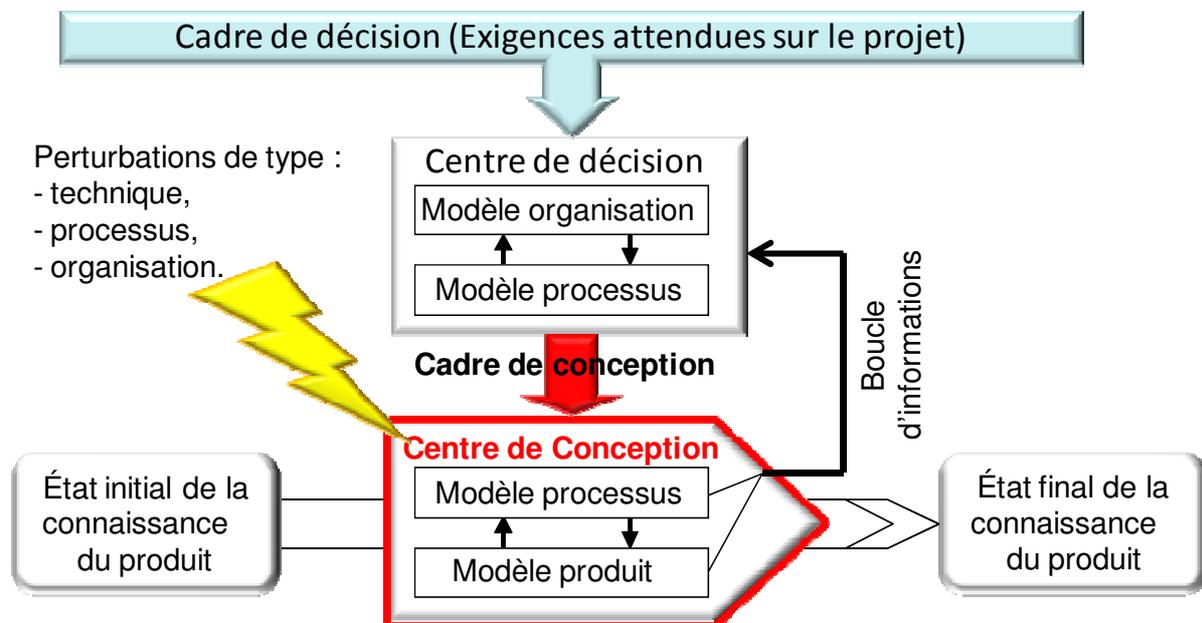


Figure 70 : Mise en place de perturbations dans le système technologique.

Nous avons volontairement découplé les types de perturbation car notre objectif n'est pas de résoudre un problème lié à une perturbation réelle (i.e. complexe) mais plutôt de montrer les conséquences de la mise en place de perturbations d'origines différentes sur une performance particulière d'un projet.

Dans ce chapitre, nous nous focaliserons sur la **performance énergétique** et son évolution. Cette performance est évaluée à l'aide d'un indicateur que l'on désignera par IP_e . Cet indicateur projet dépend de trois caractéristiques :

- le rendement énergétique de la turbine haute pression (η_e),
- le coût de développement du projet (c),
- le délai de développement du projet (t).

Sous forme mathématique cet indicateur peut s'écrire : $IP_e = f(\eta_e, c, t)$. Le rendement énergétique renvoie à une caractéristique technique. Cette caractéristique a été retenue parce

qu'elle permet d'évaluer de façon pertinente la fonction de service (i.e. la fonction principale) d'une turbine haute pression. Cette fonction de service a été définie dans le paragraphe 3.3.3.1 par l'intitulé « Transformer une puissance fluide en puissance mécanique ». Le coût et le délai de développement renvoient, quant à eux, à des caractéristiques de type processus et organisation. Les spécifications sur ces caractéristiques permettent de prendre en compte les variations, par rapport au plan d'activité attendu, du processus de conception et de l'affectation des ressources.

Nous envisageons deux valeurs possibles pour l'indicateur de performance énergétique : conforme ou non-conforme. L'indicateur renvoie la valeur conforme lorsque les spécifications des trois caractéristiques satisfont tous leurs objectifs. L'indicateur renvoie la valeur non-conforme lorsqu'au moins une des spécifications des trois caractéristiques ne satisfait pas un des objectifs. La notion de « compromis » entre les caractéristiques sera abordée lors de la résolution des perturbations de type processus et organisation. Le Tableau 6 représente les caractéristiques impactées par les exemples de perturbations mises en place dans ce scénario. Ce tableau n'est en aucun cas généralisable à n'importe quel type de perturbation.

	Rendement énergétique	Coût de développement	Délai de développement
Perturbation technique dans le bureau d'études			
Perturbation technique dans le bureau des méthodes			
Perturbation de type processus			
Perturbation organisationnelle			

Tableau 6 : Caractéristique impactée en fonction des perturbations proposées.

Les mécanismes de transferts de spécifications présentés dans le chapitre précédent doivent permettre de formaliser la traçabilité des spécifications et ainsi d'asseoir la robustesse des indicateurs de performance mis en œuvre dans une plateforme de type PPO.

5.1 Description du scénario

Le scénario présenté dans ce chapitre s'inspire d'un cas réel de conception d'une turbine haute pression. L'objectif est d'illustrer une démarche de conception sur un produit respectant des spécifications techniques et plus généralement des spécifications projet.

Avant de mettre en place des perturbations dans le scénario, celui-ci va être complètement décrit afin de permettre d'illustrer ultérieurement leurs conséquences. La définition du produit est jalonnée en états. Ces états successifs seront décrits puis le processus de conception et ses activités permettant cette évolution seront présentés.

Le cadre de conception permettant de piloter le processus de conception provient d'un processus de décision. Ce dernier sera également décrit et mis en relation avec son environnement en utilisant les grilles GRAI R&D.

5.1.1 Evolution du modèle produit

Au cours du cycle de conception, la connaissance sur le produit s'enrichit continuellement. Le modèle produit permet de décrire les états successifs du produit générés par le processus de conception (à ne pas confondre avec l'activité de conception des réseaux GRAI R&D). Les états des modèles produit et processus de conception sont liés et s'enchaînent. Au niveau du modèle produit, cette évolution revient à ajouter de nouvelles entités et à augmenter leur niveau de définition. Les paragraphes suivants présentent ces différents états en identifiant les évolutions apportées.

5.1.1.1 Description de l'état initial du modèle produit : état 0

Lors de la conception architecturale, l'état initial du modèle produit peut se présenter sous une forme minimale (voir figure 71) à savoir un seul composant, une seule interface et une seule fonction. A ce stade, un concept de turbine haute pression a été retenu. Ce choix de concept est basé sur des considérations stratégiques liées à l'entreprise et prend en compte l'expérience acquise sur les concepts de turbine étudiés ou non, la volonté d'innovation, la prise de risque de l'entreprise, etc.

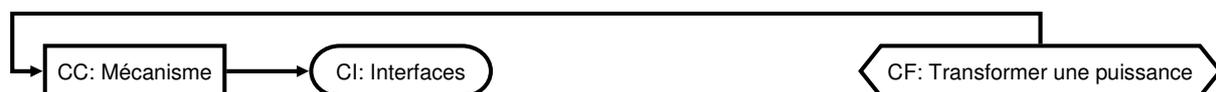


Figure 71 : Etat initial du modèle produit lié à la turbine haute pression.

Le « Mécanisme » (i.e. la turbine haute pression) est solution technique d'une fonction de service « Transformer une puissance fluide en puissance mécanique ». Cette fonction de service représente la fonction principale du mécanisme. Un mécanisme possède obligatoirement une interface et c'est par elle que le mécanisme va répondre à la fonction principale.

Au cours du cycle de conception, la fonction principale va être décomposée jusqu'à faire apparaître des spécifications. Les pièces constituant le mécanisme devront, au travers de leurs interfaces, respecter ces spécifications pour garantir la satisfaction de la fonction principale et donc la conformité du mécanisme vis-à-vis de l'expression du besoin.

L'état 0 du modèle produit ne permet généralement pas aux acteurs de la conception d'utiliser leurs outils, une décomposition structuro-fonctionnelle du produit est nécessaire. Celle-ci est généralement obtenue à l'issue d'une analyse fonctionnelle et d'une analyse de la valeur. Dans notre cas, la structure de la turbine haute pression n'est pas à créer de toute pièce. Elle est, en réalité, déjà connue mais peut éventuellement être remise en cause.

5.1.1.2 Décomposition structuro-fonctionnelle du modèle produit : état 1

A l'issue de la décomposition structuro-fonctionnelle, le modèle produit s'est développé et fait apparaître plus de détails sur les entités définies dans l'état 0 (voir figure 72). Par définition, une turbine haute pression comprend un rotor guidé en rotation par un stator : voir Annexe. Le composant correspondant au stator est constitué de carters et de l'anneau de turbine haute pression. Le rendement énergétique de ce mécanisme dépend de pertes liées aux fuites internes. Ces fuites dépendent de la section comprise entre le sommet des aubes du

rotor et l’anneau de la turbine haute pression, on parle alors de section de fuite de la turbine. Ainsi, l’anneau de turbine haute pression est caractérisé très tôt, car l’architecture de ce composant est très sensible sur la section de fuite. La maîtrise de cette section passe par des spécifications géométriques liées au jeu rotor/stator en sommet d’aubes. C’est pourquoi, la décomposition représentée dans la figure 72 présente le composant « Anneau » dès le niveau de détail 1 du produit. De plus, vis-à-vis du guidage en rotation entre le rotor et le stator, les solutions de guidage isostatiques sont privilégiées pour palier aux diverses variations géométriques des composants lors du fonctionnement de la turbine haute pression.

Le passage de l’état 0 à l’état 1 correspond à une décomposition structuro-fonctionnelle du produit. Cette décomposition constitue la première étape d’un transfert interniveaux (aspect qualitatif). Le niveau de détail du produit s’est enrichi, le composant « Mécanisme » se décompose en trois composants (« Rotor_1 », « Anneau_2 » et « Carters_3 »). La fonction de service se décompose en une multitude de sous-fonctions (nous ne représentons ici que celles liées au guidage en rotation).

Les interfaces sont alors mises en place pour mettre en relation les composants et les fonctions.

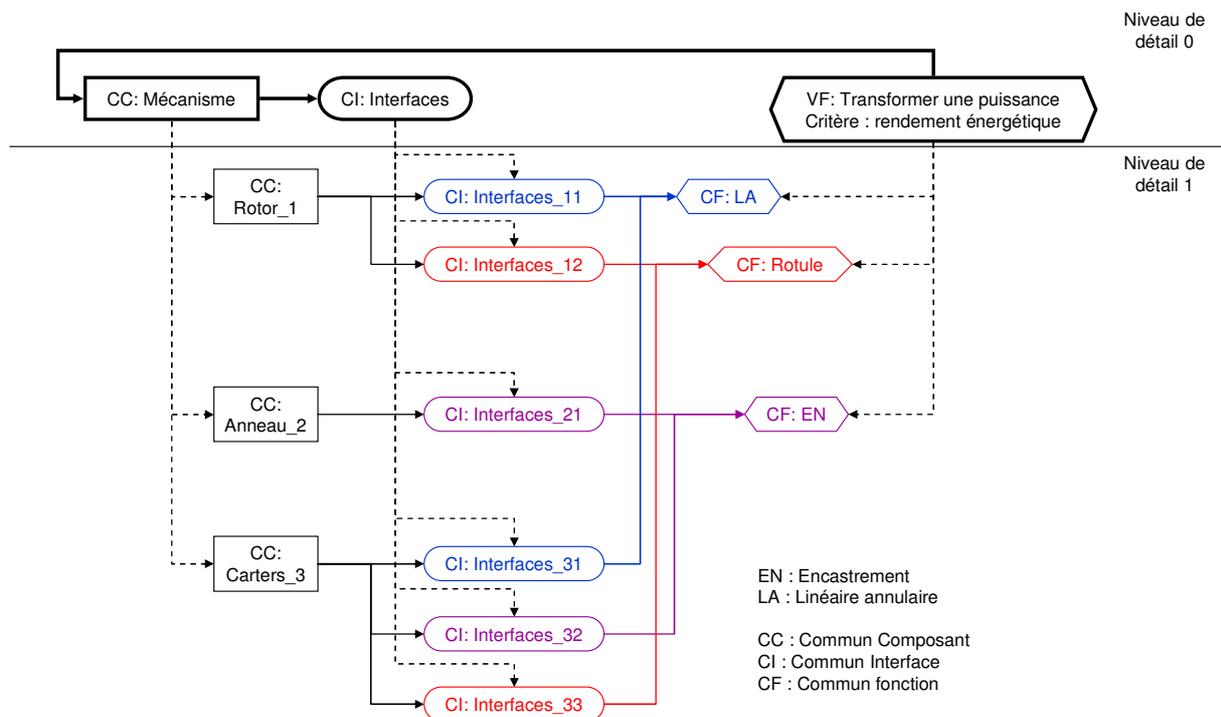


Figure 72 : Etat 1 du modèle produit.

En se basant sur les retours d’expériences, les concepteurs de turbine haute pression savent que le critère « rendement énergétique » de la fonction « Transformer une puissance [fluidique en puissance mécanique] » est liée à celle de la fonction encastrement « EN » : voir figure 72. La mise en position nécessaire à cet encastrement a un effet direct sur la déformation de l’anneau [Pierre *et al.*, 09]. Cette mise en position est assurée par un appui plan et un centrage court. Une liaison encastrement entre deux composants du stator est généralement appelée « bride ». Il existe un nombre important de variantes de solutions techniques de bride [Pierre *et al.*, 10].

A partir de cet état de description du modèle produit, les activités du processus de conception dans le bureau d’études vont être déployées en parallèle. Afin de faciliter la

compréhension du scénario, nous ne les représenterons pas individuellement. Ainsi, le processus de conception est représenté de manière séquentielle (voir paragraphe 5.1.2). La description d'une activité du processus de conception contiendra toutes les activités ayant lieu simultanément.

A ce stade de la conception, les diverses expertises ne peuvent pas utiliser leurs outils car les fonctions décrites dans le modèle produit ne sont pas directement exploitables. En effet, pour les experts tolérancement géométrique et thermomécanique, le critère « Rendement énergétique » n'indique pas explicitement quels éléments simuler et quelles limites de variation choisir par exemple. Une corrélation des fonctions est nécessaire.

5.1.1.3 Corrélation des fonctions vis-à-vis des vues métiers : état 2

Il s'agit de la première étape d'un transfert intervues (aspect qualitatif) : la fonction « Transformer une puissance » est corrélée pour être utilisable par les différentes expertises désignées dans le système décisionnel pour travailler sur le produit. Le scénario envisage l'utilisation des expertises tolérancement géométrique et thermomécanique.

La fonction « Transformer puissance » et plus particulièrement son critère « Rendement énergétique » se décompose vis-à-vis de ces deux vues métiers en critères « Jeu rotor/stator [en sommet d'aubes de turbine haute pression] » pour l'expertise tolérancement géométrique, et « Variation géométrique du stator (i.e. l'anneau de turbine haute pression) » pour l'expertise thermomécanique : voir figure 73. Concrètement cela signifie que pour garantir le rendement énergétique formulé dans le cahier des charges, il est nécessaire de maîtriser à la fois le jeu rotor/stator et la variation géométrique de l'anneau de turbine. Sans la connaissance de ces relations de corrélation, la conception peut néanmoins avoir lieu mais celle-ci ne peut qu'être hasardeuse dans la qualité du produit final.

La corrélation des critères présents dans l'état 1 fait évoluer la description du modèle produit : voir figure 73. Pour une meilleure lisibilité, le passage est illustré dans le niveau de détail 0.

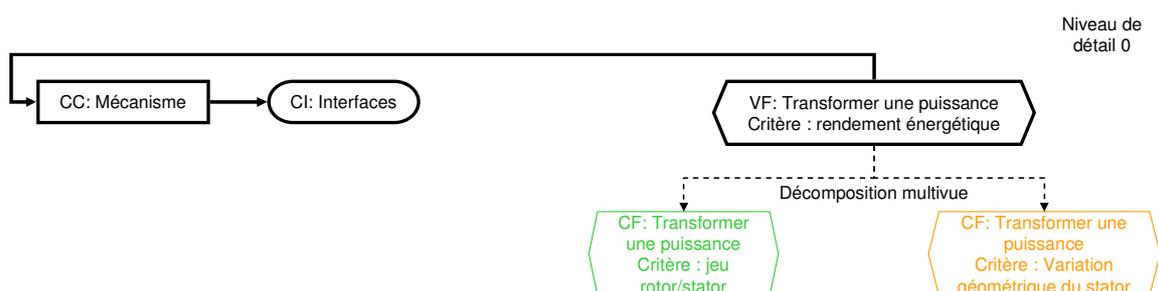


Figure 73 : Passage de l'état 1 à l'état 2 du modèle produit dans le niveau de détail 0.

La fonction « Transformer une puissance » prend le qualificatif « Vue » pour indiquer que la décomposition est multivue. Les fonctions dont un de leurs critères a été corrélé prennent, quant à elles, le qualificatif « Commune ». Les acteurs de la conception n'ont, en pratique, pas accès à toutes les informations du modèle produit puisque l'une de ses caractéristiques est qu'il permette de fournir à la bonne personne et au bon moment la bonne information. Au niveau de détail 0, le résultat du transfert intervues n'est pas exploitable. Il est donc nécessaire d'effectuer un transfert interniveaux pour se retrouver au niveau de détail 1 : voir figure 74.

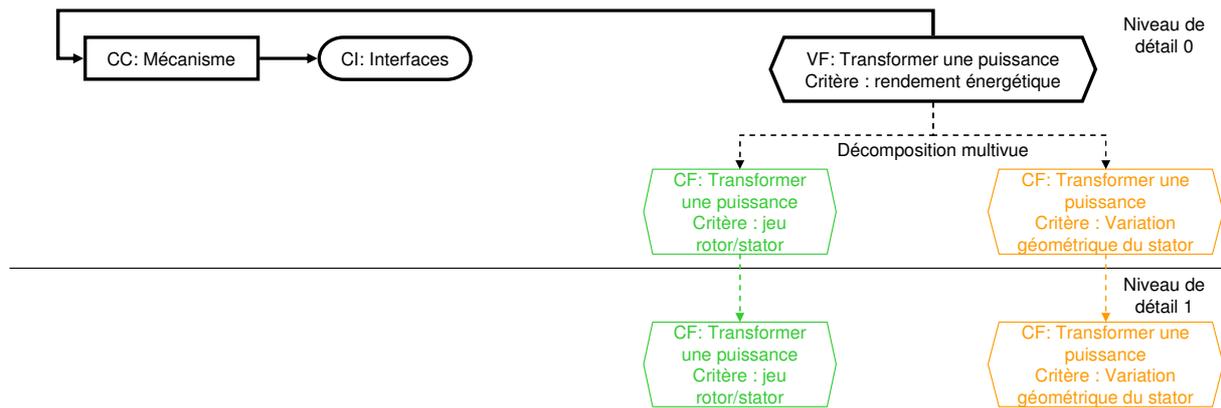


Figure 74 : Description du passage du niveau de détail 0 à 1 des fonctions du produit.

Concrètement, une expertise effectue son transfert interniveaux avec des entités qualifiés de communes qu'un autre acteur pourra réutiliser ou non lors de sa propre expertise. La figure 75 représente la vision d'une expertise sur le modèle produit au niveau de détail 1.

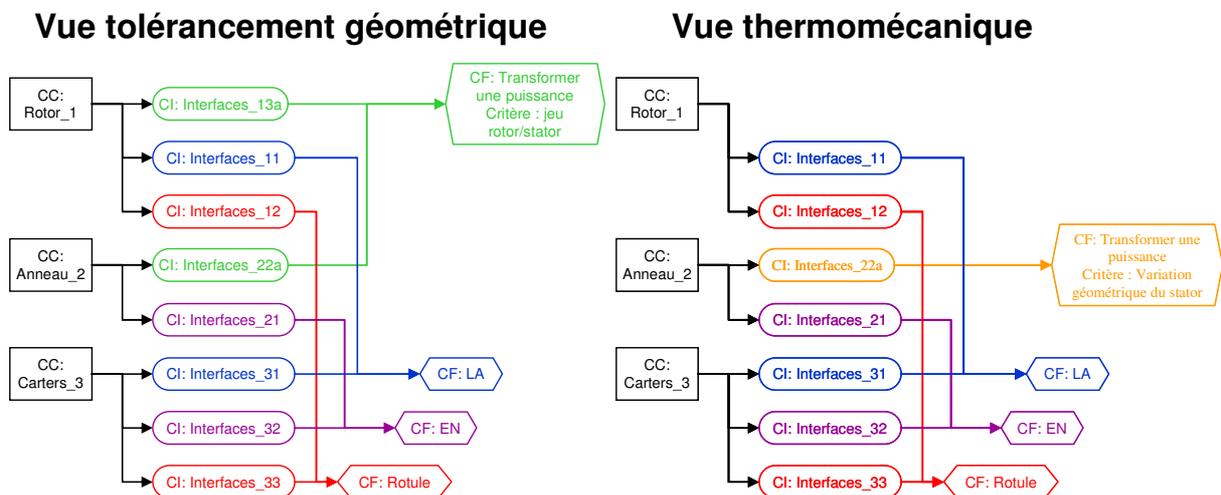


Figure 75 : Etat 2 simplifié du modèle produit : point de vue tolérancement géométrique et point de vue thermomécanique.

De nos jours, la corrélation est réalisée par un acteur de la conception car elle nécessite des connaissances provenant essentiellement de l'expérience et du savoir-faire. Il n'existe en général pas d'outils analytiques permettant d'obtenir ce résultat automatiquement.

5.1.1.4 Déploiement des transferts de spécifications interniveaux et intervues : état 3

Le passage de l'état 2 à l'état 3 constitue la seconde étape d'un transfert de spécifications interniveaux et intervues, c'est-à-dire l'aspect quantitatif.

La fonction « Transformer une puissance » renvoie à critère sur le rendement énergétique du type $\eta_e > \eta_{emin}$.

Ce critère est déployé dans les différentes vues métier par l'intermédiaire des **mécanismes de transferts de spécifications intervues** (voir figure 76) :

- pour l'expertise tolérancement géométrique, ce critère est corrélé en un jeu rotor/stator supérieur à une valeur minimale pour maîtriser le risque de touche des pales sur l'anneau de turbine : $J_{\text{rotor/stator}} > J_{\text{min}}$,
- pour l'expertise thermomécanique, ce critère est corrélé en extremums sur la section de fuite caractérisant la surface comprise entre les contours intérieurs de l'anneau et extérieur du rotor (voir figure 77) : $S_{\text{fuite}} < S_{\text{max}}$.

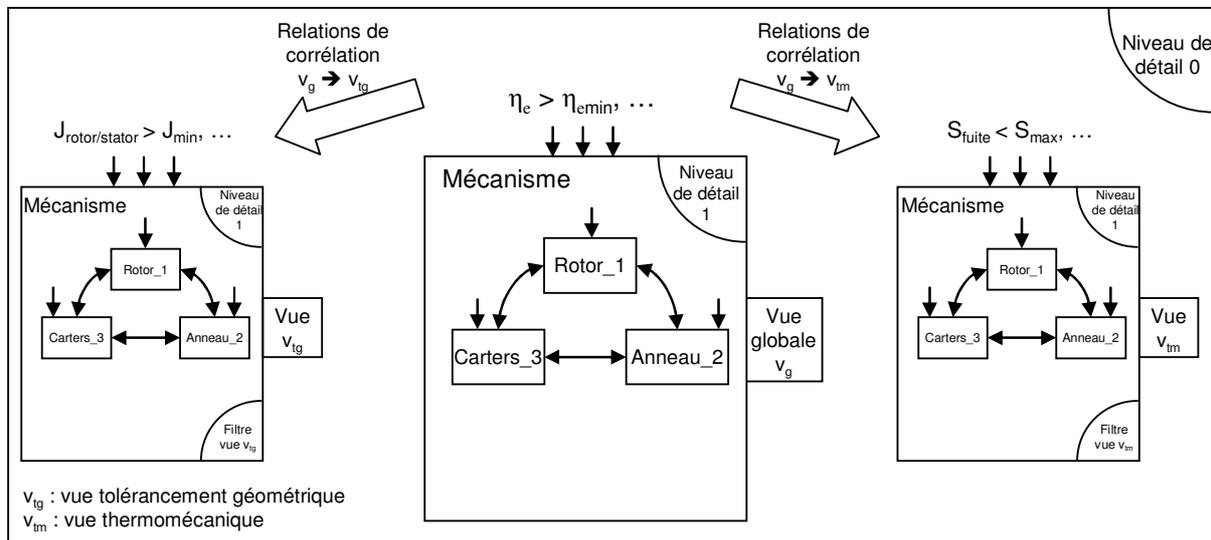


Figure 76 : Transfert de spécifications intervenues vers les vues tolérancement géométrique et thermomécanique.

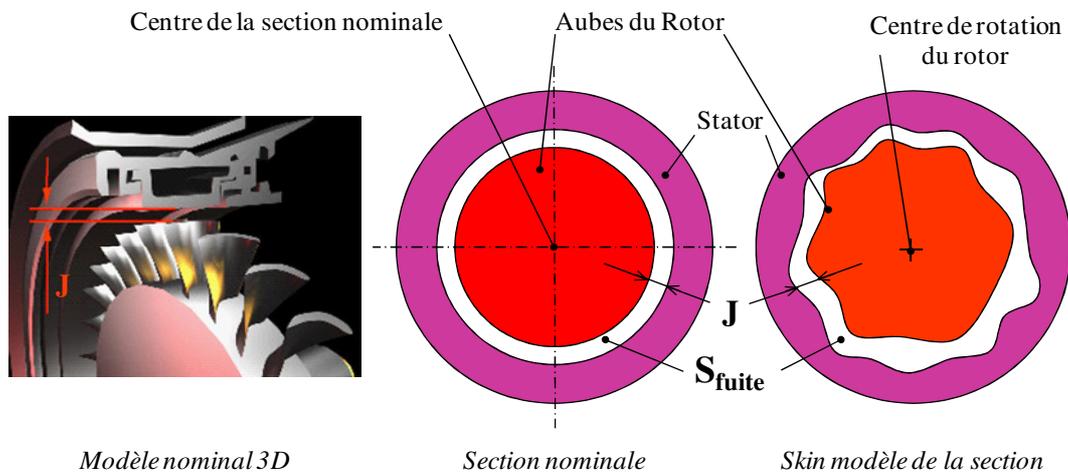
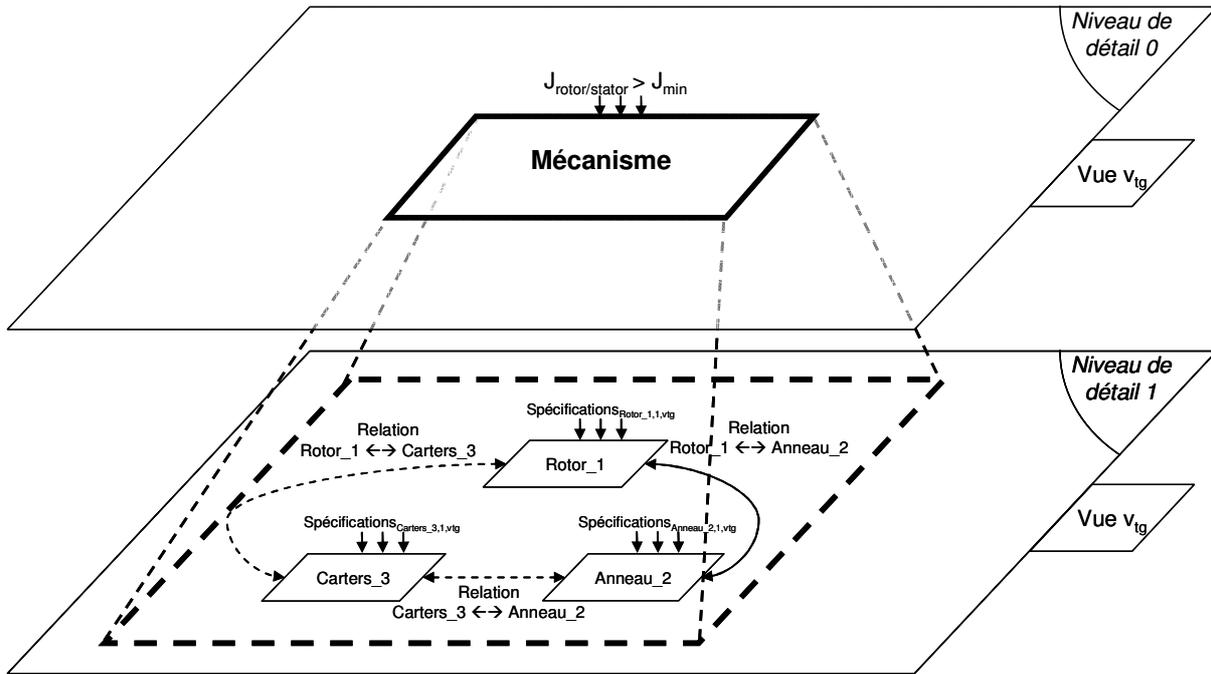


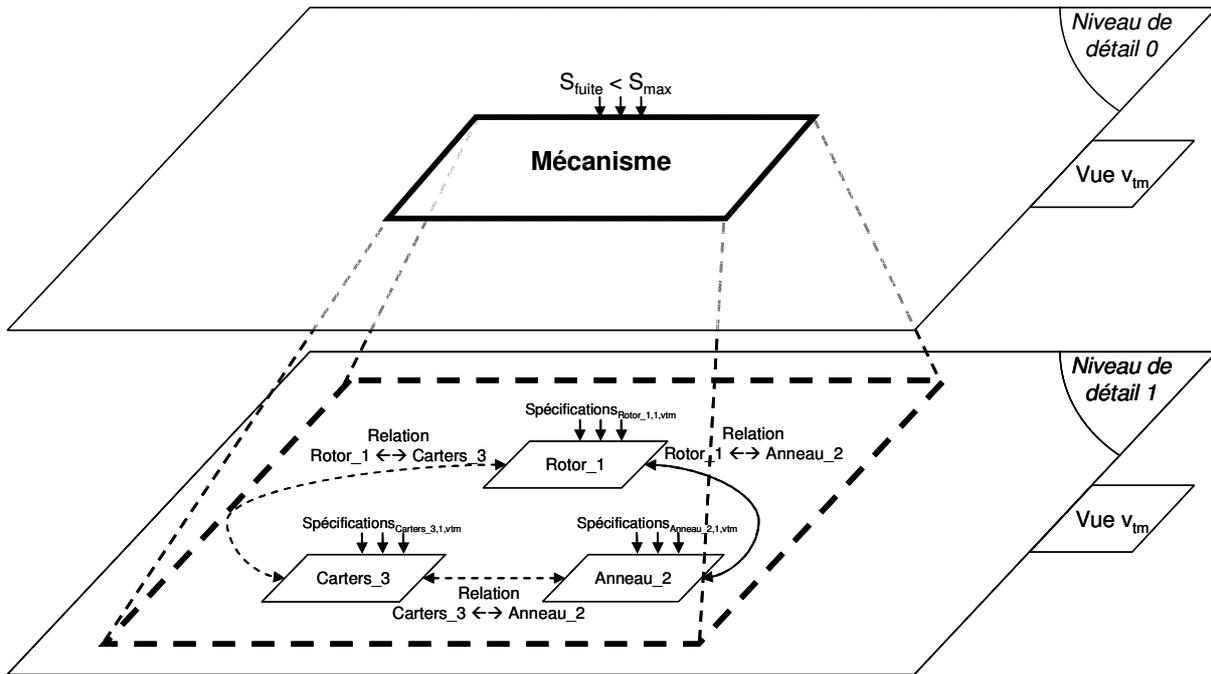
Figure 77 : Définition du jeu rotor/stator et de la section de fuite d'une turbine haute pression [Pierre et al., 10].

Les spécifications « fonctionnelles » obtenues par le transfert de spécifications intervenues, vont générer d'autres spécifications sur tout ou partie des entités du produit. La détermination de ces spécifications ainsi que leurs valeurs est obtenue par des **mécanismes de transferts de spécifications interniveaux** dans chaque vue métier : voir figure 78 et figure 79.



Vue tolérancement géométrique

Figure 78 : Transfert de spécifications interniveaux dans la vue tolérancement géométrique.



Vue thermomécanique

Figure 79 : Transfert de spécifications interniveaux dans la vue thermomécanique.

Pour l'expert tolérancement géométrique, la condition sur le jeu rotor/stator va, par exemple, générer des spécifications sur des éléments (surfaces, axes, points) de chaque pièce impactée par cette condition : voir figure 80.

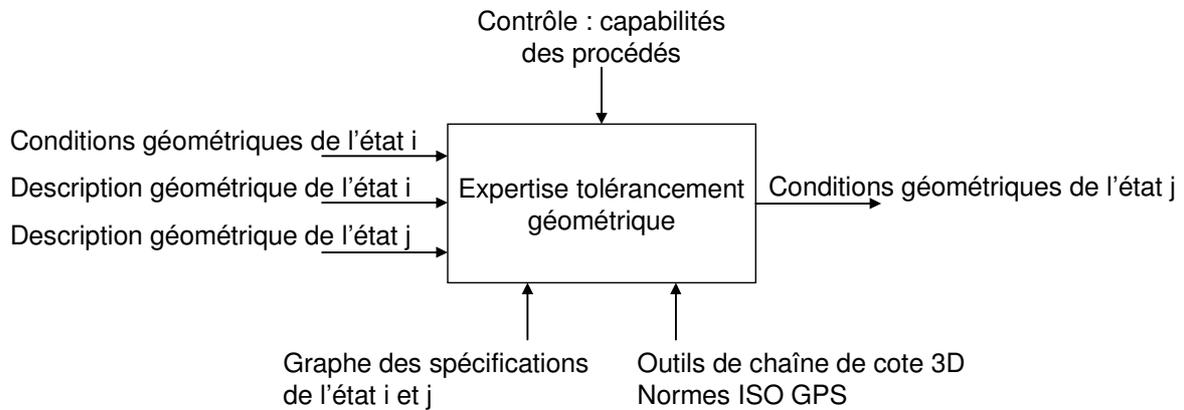


Figure 80 : IDEFØ de l'activité de l'expertise tolérancement géométrique adapté de [Dufaure, 05].

Pour l'expert thermomécanique, les conditions thermomécaniques initiales sur l'anneau de turbine haute pression (contacts, déplacements imposés, températures, matériau, etc.) permettent de déterminer les champs de déplacement. Ainsi, il est possible d'évaluer la variation de la section de fuite au cours du fonctionnement de la turbine haute pression : voir figure 81.

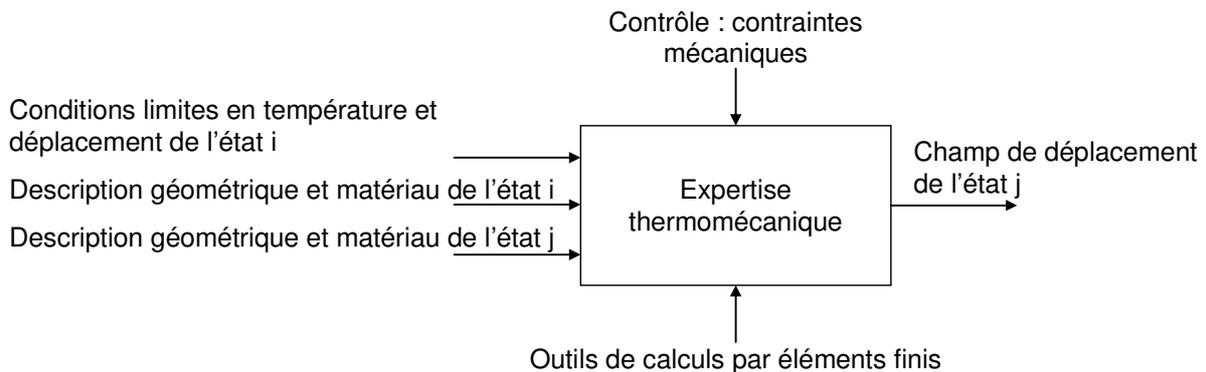


Figure 81 : IDEFØ de l'activité de l'expertise thermomécanique.

Le transfert de spécifications interniveaux doit être reconduit pour chaque alternative de solutions c'est-à-dire, par exemple, pour chaque configuration d'encastrement entre l'anneau de turbine haute pression et les carters.

La détermination qualitative et quantitative des spécifications provient pour la première, essentiellement des acteurs et pour la seconde de l'utilisation d'outils métiers spécifiques. Une description détaillée de la manière dont ces spécifications peuvent être déterminées est fournie en Annexe.

5.1.1.5 Récupération des informations provenant du bureau des méthodes : état 4

Entre l'état 3 et l'état 4, le modèle produit a été enrichi d'informations provenant du bureau des méthodes : voir figure 82. Du point de vue du concepteur, il s'agit d'un « saut » de définition du modèle. Le processus de conception permettant de passer de l'état 3 à l'état 4 est représenté dans la figure 83.

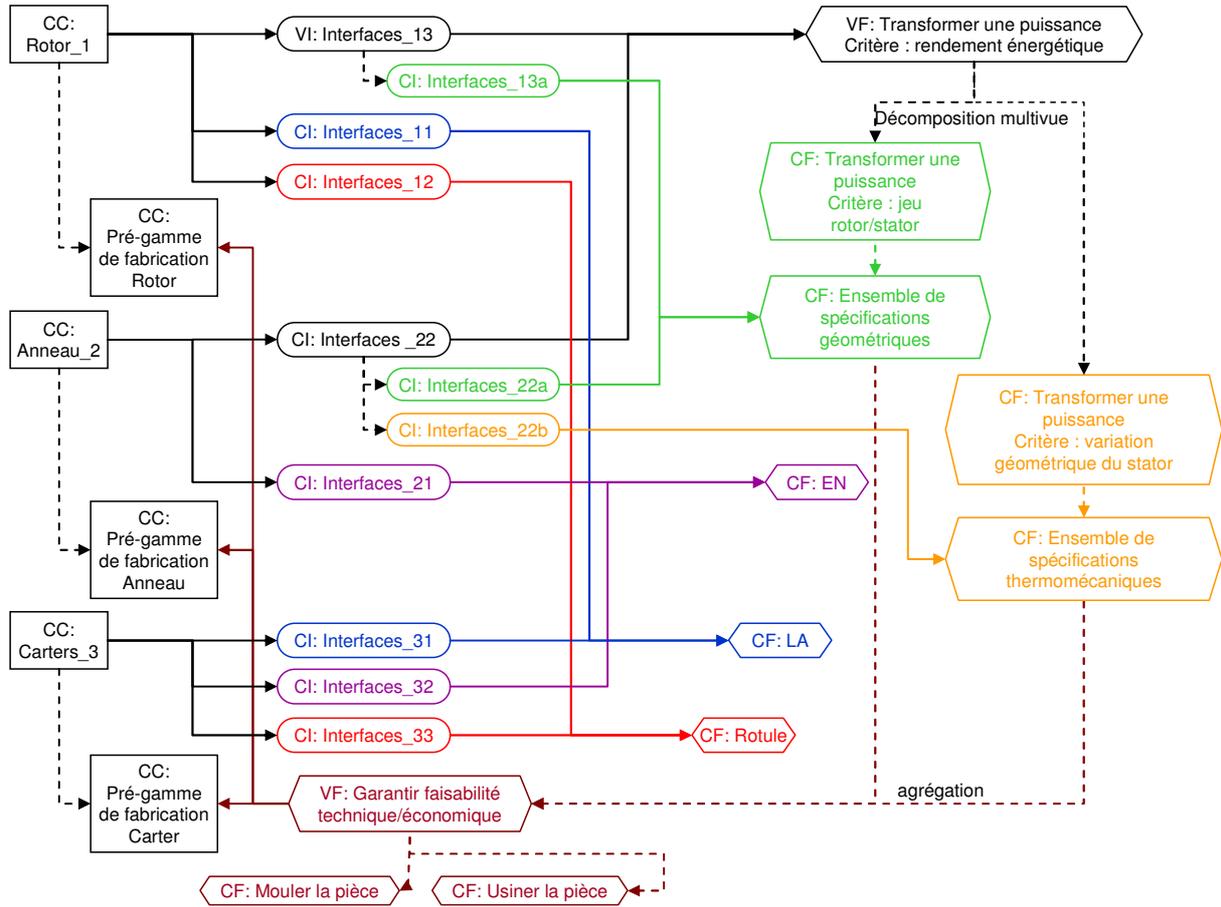


Figure 82 : Etat 4 au niveau de détail 1 du modèle produit.

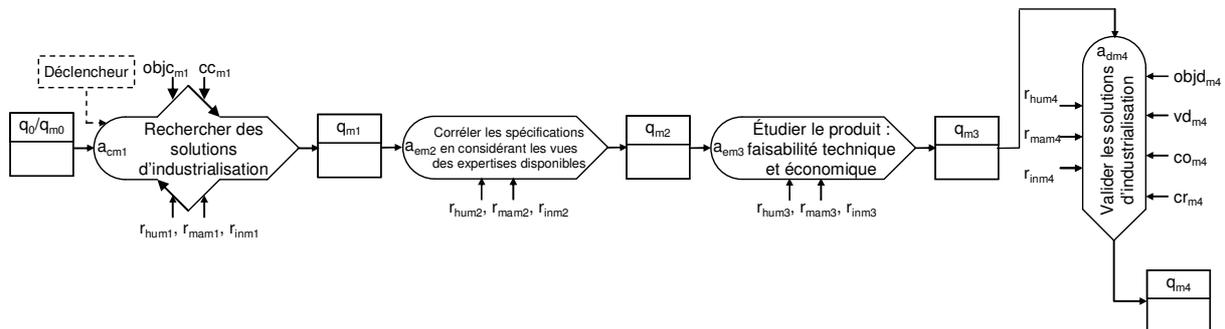


Figure 83 : Processus de pré-industrialisation dans le bureau des méthodes.

L'état 4 du modèle produit (figure 82) résulte du travail du bureau des méthodes. Ce travail consiste en la récupération des spécifications issues du travail des experts du bureau d'études afin de répondre à la problématique de faisabilité technique et économique des solutions envisagées. A l'issue du processus de conception dans le bureau des méthodes, des pré-gammes de fabrication (pré-industrialisation) sont proposées pour chaque alternative de

solutions résultant des différentes configurations d'encastrement entre les composants « Carters » et « Anneau ». Une pré-gamme de fabrication est ici considérée comme un sous-composant solution technique de la fonction « Transformer une puissance ». Cette représentation des pré-gammes permet de dissocier les informations intrinsèques au composant de celles provenant de l'industrialisation.

5.1.1.6 Choix de solutions d'architectures : état final 5

L'état 5 du modèle produit ne présente visuellement aucune différence avec l'état 4. En effet, l'état 5 correspond uniquement à un choix entre les alternatives de solutions de la fonction « EN » (encastrement). Une ou quelques solutions ont été retenues après comparaison des différentes études en utilisant des informations techniques mais également des informations sur la pré-industrialisation. En supposant qu'au moins une solution convienne à tous les objectifs, cette solution sera développée en conception détaillée avec des informations envoyées depuis des centres de décision au niveau opérationnel. Si aucune solution ne convient alors le bureau d'études doit demander au système décisionnel la modification de son cadre de conception (i.e. ses objectifs, ses contraintes, ses critères, etc.)

5.1.1.7 Conclusion

Les états successifs du processus de conception ont été décrits par différents états du modèle produit en cours d'évolution. Cette description permet de mettre en évidence :

- le transfert interniveaux de spécifications produit,
- le transfert intervues de spécifications produit.

Les états successifs du processus de conception peuvent également être décrits par les activités ayant permis leurs évolutions. Nous nous proposons, dans le paragraphe suivant, de présenter les activités se déroulant dans le bureau d'études et dans le bureau des méthodes.

5.1.2 Evolution du processus de conception dans le bureau d'études et le bureau des méthodes

En fonction du type de conception considéré (innovante ou routinière), la connaissance structuro-fonctionnelle du produit est plus ou moins définie à l'avance. En conception innovante, les activités du processus de conception sont décidées et exécutées au fur et à mesure de l'avancement du projet. En conception routinière, premièrement, le squelette du produit est connu, il s'agit essentiellement d'exécuter les activités permettant d'enrichir sa description, ce qui revient, dans le modèle produit, à définir les attributs de chaque entité. Deuxièmement, la trame du processus de conception est parfois aussi connue. Dans certaines entreprises, comme les hélicoptéristes, les avionneurs ou les constructeurs automobiles, le processus de conception est quasi totalement défini avec des jalons à respecter pour pouvoir tenir les délais.

Le processus de conception global d'une turbine haute pression dans le bureau d'études peut être représenté sous une forme compacte : voir figure 84. L'état q_{0e} correspond à l'état initial de la connaissance du produit modélisable par le modèle produit (état 0). L'état q_{1e}

correspond à l'état final. Sa modélisation par le modèle produit renvoie à l'état 5 défini dans le chapitre précédent d'où la notation q_{e5} .

L'ensemble des spécifications nécessaires au processus de conception est contenu dans un cadre de conception. La figure 84 représente, dans sa partie haute, ces spécifications.

Le niveau de détail du processus de conception présenté dans la figure 84 est suffisant tant que son exécution n'a pas été engagée. Pour exécuter ce processus et affecter les spécifications à chaque activité élémentaire de type conception, décision ou exécution, il est nécessaire de passer à un niveau de détail affiné dans lequel les acteurs auront à intervenir. En effet, les acteurs impliqués par ce processus n'ont pas encore été affectés à une tâche particulière (i.e. soit ils sont en attente soit ils sont affectés sur d'autres projets).

Cadre de conception (bureau d'études)

- Objectifs de conception	- Respect des fonctions du cahier des charges (Garantir rendement énergétique, ...)
- Contraintes de conception	- Utiliser un anneau monobloc ou segmenté, - Utiliser un anneau métallique, - Ne pas utiliser de barrières thermiques,
- Objectifs de décision	- Faisabilité technico-économique, ...
- Critères	- Sécurité (interdire le risque de touche des pales, ...)
- Contraintes (de décision)	- Limiter les coûts et les délais de développement, ...
- Variables de décision	- Coût d'industrialisation, ...
- Ressources	- Ressources internes à l'entreprise, ...

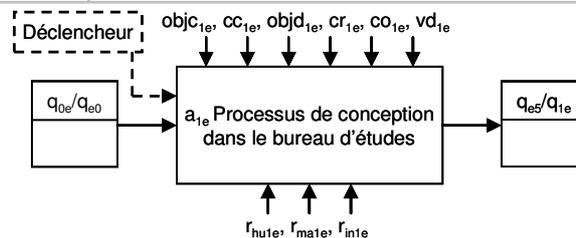


Figure 84 : Forme compacte du processus de conception dans le bureau d'études.

Le processus de conception sous sa forme développée est défini de manière relativement générique. Il contient quatre activités élémentaires : voir figure 85. Ces activités sont, dans l'ordre chronologique, une activité de conception, deux activités d'exécution et une activité de décision. Le caractère itératif du processus de conception n'est pas représenté, si ce n'est implicitement dans l'activité de conception. Le processus de conception dans le bureau des méthodes a déjà été représenté dans les paragraphes précédents (voir figure 83). Les éléments du cadre de conception doivent être transférés de la forme compacte à la forme développée du processus de conception. Ce transfert correspond à un transfert interniveaux de spécifications projet : spécifications produit, spécifications de type processus (durée des activités par exemple) et spécifications organisationnelles (ressources, etc.).

Les activités élémentaires du processus de conception nécessitent des supports. Certains types de supports, sont affectés à toutes les activités, comme les ressources, alors que d'autres ne sont envoyés qu'à un certain type d'activités comme, par exemple, les objectifs de conception.

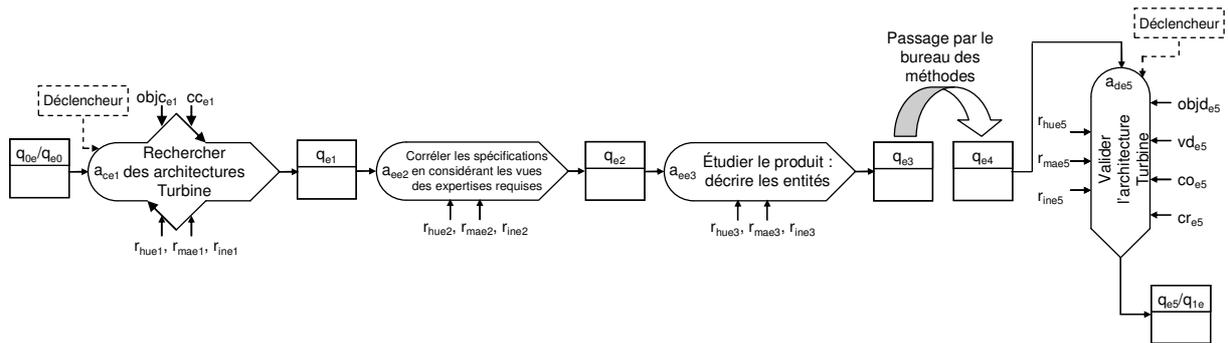


Figure 85 : Forme développée du processus de conception dans le bureau d'études.

Le transfert interniveaux dans le processus de conception consiste à déployer les supports d'un processus (ou d'une activité) vers des sous-processus : voir figure 86. Dans le scénario de conception proposé, il s'agit plus particulièrement d'affecter les ressources de la forme compacte du processus vers les activités élémentaires le constituant. Cette affectation est particulièrement complexe dans un contexte multiprojet. Les outils de planification et de gestion des ressources doivent être mis en œuvre pour prendre en compte la disponibilité et les capacités des ressources nécessaires à l'exécution du processus. Pour les ressources humaines, d'autres éléments peuvent être pris en considération comme la composition des groupes de travail [Robin, 05].

Dans les paragraphes suivants, les différentes activités élémentaires du processus de conception dans le bureau d'études seront détaillées et mises en relation avec la description des états du modèle produit dans le but d'illustrer le transfert interniveaux de spécifications projet dans le processus de conception.

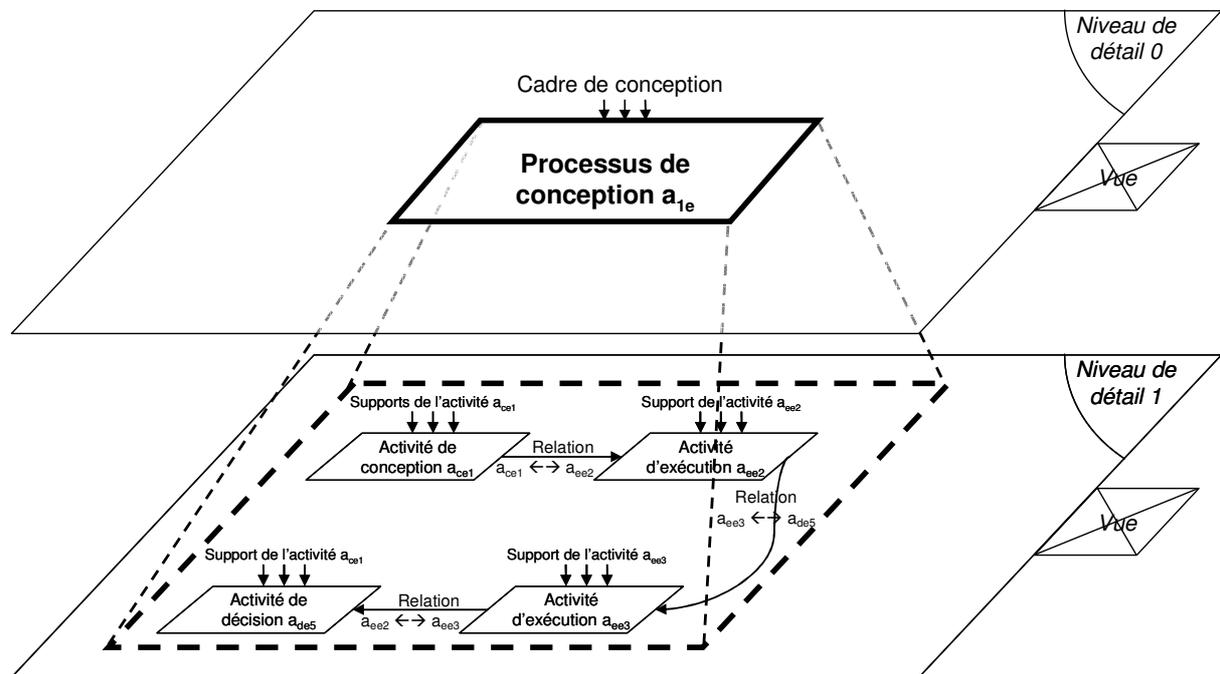


Figure 86 : Transfert interniveaux de spécifications projet dans le processus de conception du bureau d'études.

5.1.2.1 Activité de conception dans le bureau d'études

La première activité du processus de conception est une activité de conception (voir figure 87). Cette activité a pour but de rechercher différentes architectures de turbine haute pression (HP). Ces différentes architectures correspondent aux types d'anneau (segmenté ou monobloc), aux types de brides, etc.

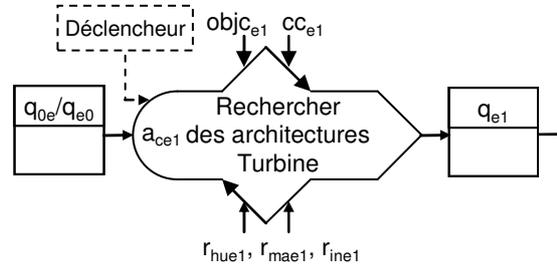


Figure 87 : Activité de conception dans le processus de conception de la turbine HP.

Pour étudier les différentes alternatives il est nécessaire d'effectuer une décomposition structuro-fonctionnelle du produit. L'activité de conception permet de réaliser cette étape. Elle est associée à un déclencheur permettant de lancer l'activité lorsque toutes les conditions sont réunies. Son exécution doit prendre en compte des objectifs de conception, comme le respect des fonctions du cahier des charges, et des contraintes de conception, comme l'utilisation ou non de barrières thermiques.

Le processus de conception n'ayant qu'une seule activité de conception le transfert de ces objectifs et de ces contraintes du cadre de conception vers l'activité est direct.

Cette activité requiert une équipe projet comprenant un expert de chaque phénomène physique mis en jeu dans la turbine haute pression, par exemple, un expert thermomécanique, un expert tolérancement géométrique, un expert pour la dynamique de la ligne d'arbre ou un expert aérodynamicien. Les ressources doivent être internes à l'entreprise (cf. cadre de conception). L'affectation des ressources est ici primordiale car la non-disponibilité de l'une d'entre elles peut bloquer le processus de conception.

5.1.2.2 Première activité d'exécution dans le bureau d'études

La deuxième activité du processus de conception est une activité d'exécution (voir figure 88). Son objectif est de corréliser les spécifications issues du cahier des charges en spécifications utilisables par les experts. Ces spécifications, que le produit doit respecter, ne sont pas toujours directement exploitables par une expertise métier. Cette activité effectue une corrélation des spécifications en considérant la vue métier. Cette corrélation est peu automatisable et nécessite uniquement des savoirs et savoir-faire souvent acquis avec l'expérience et parfois rassemblés dans des bases de connaissances.

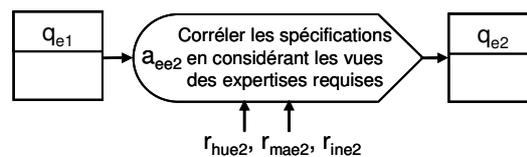


Figure 88 : Première activité d'exécution dans le processus de conception de la turbine HP.

Cette activité n'a pas de déclencheur et se lance dès que les premiers éléments de l'activité précédente sont disponibles. Après l'activité de conception, plusieurs alternatives

sont à envisager. Ces alternatives sont regroupées dans le modèle produit grâce au qualificatif « Alternative » associé à certaines entités.

Dans ce type d'activité seule l'affectation des ressources est prise en compte. Dans notre exemple, un groupe d'experts thermodynamiciens est nécessaire. La problématique de la disponibilité des ressources présentée dans le paragraphe précédent est toujours présente.

5.1.2.3 Deuxième activité d'exécution dans le bureau d'études

La troisième activité du processus de conception est également une activité d'exécution (voir figure 89). Cette activité consiste à étudier le produit au travers des outils métier. Chaque solution est étudiée afin de déterminer si elle répond ou non aux objectifs définis lors de la première activité du processus. L'étude des diverses solutions nécessite un transfert interniveaux et intervues des spécifications produit.

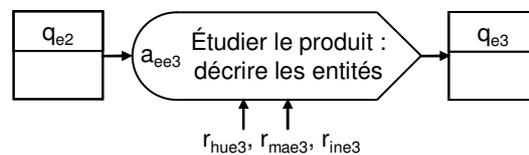


Figure 89 : Deuxième activité d'exécution dans le processus de conception de la turbine HP.

Cette activité ne possède pas de déclencheur et se déroule dès que les premiers éléments de l'activité précédente sont disponibles. Pour alléger la représentation, une seule activité est représentée. Pour définir complètement cette activité il faudrait la décomposer et effectuer un transfert interniveaux des supports des activités (i.e. des ressources). L'affectation précise des ressources à un niveau de détail plus élevé n'est pas représentée.

Pour être exécutée, cette activité nécessite un ou plusieurs experts tolérancement géométrique et experts thermomécanique, des postes informatiques, des logiciels et outils métier, etc.

Les mécanismes de transferts de spécifications interniveaux dans le processus de conception sont particulièrement pertinents pour la décomposition de cette activité. En cas de problème dans le déroulement d'une des sous-activités, il est possible de déterminer précisément quel support (ici une ressource) est défaillant. Cette connaissance permet de déterminer les répercussions sur le projet et les moyens d'y remédier.

5.1.2.4 Activité de décision dans le bureau d'études

La dernière activité du processus de conception est une activité de décision (voir figure 90). Cette activité intervient après la réception des premiers éléments du processus de pré-industrialisation des solutions obtenues dans le bureau des méthodes. En agrégeant les informations sur la pré-industrialisation du produit, une ou quelques solutions peuvent être retenues. Ces solutions possèdent le meilleur compromis technico-économique. Plusieurs solutions peuvent être conservées lorsqu'à un instant donné il n'est pas possible, en les comparant, d'en écarter certaines. Au final, la solution ayant le meilleur compromis est conservée. Si aucune solution ne convient alors le système décisionnel, grâce au retour d'informations, est informé de la situation et doit modifier le cadre de conception, sans doute trop restrictif.

Cette activité utilise un déclencheur puisqu'elle est en attente d'éléments provenant d'un autre processus. Elle nécessite des objectifs de décision, des contraintes, des critères et des variables de décision. Ces supports proviennent directement de la forme compacte du processus de conception car, dans notre exemple, il n'y a qu'une seule activité de décision ayant besoin de ce type de support.

Pour être réalisée, cette activité nécessite de réunir plusieurs acteurs dont, en particulier, un expert de la dynamique de ligne d'arbre.

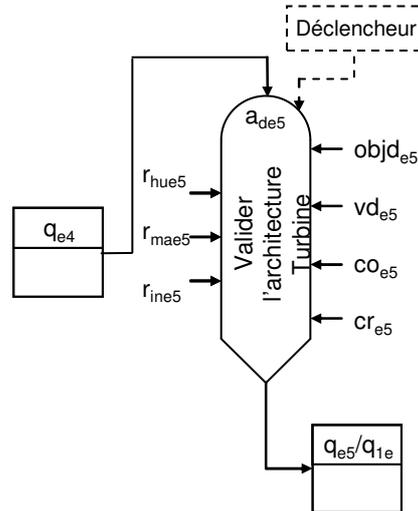


Figure 90 : Activité de décision dans le processus de conception de la turbine haute pression.

5.1.2.5 Conclusion

Les activités élémentaires du processus de conception en bureau d'études ont été détaillées. Le transfert interniveaux de spécifications projet d'un processus de conception vers ses activités élémentaires a été illustré : voir figure 91.

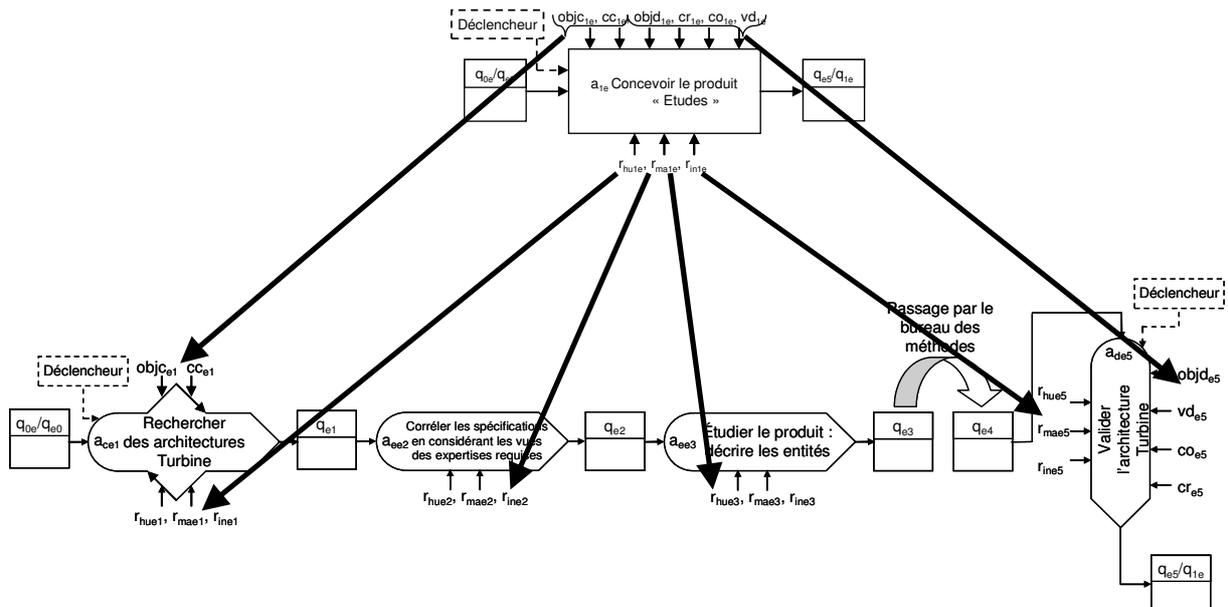


Figure 91 : Affectation des supports d'activité du processus de conception vers les activités élémentaires.

Ce transfert consiste essentiellement, pour le processus de conception considéré, à affecter des ressources. L'affectation des divers objectifs, contraintes, critères et variables de décision vers les activités élémentaires est quant à elle directe. Il est possible, comme pour les ressources, de gérer cette affectation en utilisant les mécanismes de transferts interniveaux.

Les mécanismes de transferts de spécifications permettent d'affecter aux diverses activités les ressources internes de l'entreprise en prenant en compte :

- pour les ressources informationnelles : leurs disponibilités,
- pour les ressources matérielles : leurs disponibilités et leurs capacités,
- pour les ressources humaines : leurs disponibilités, leurs compétences et leur capacité à travailler ensemble.

5.1.3 Evolution du processus de décision

Le cadre de conception présenté dans les paragraphes précédents (objectifs de conception et de décision, contraintes de conception et de décision, critères, variables de décisions et ressources) a été transmis par un centre de décision. Ce centre de décision est associé à un processus de décision (à ne pas confondre avec l'activité de décision) : voir figure 92.

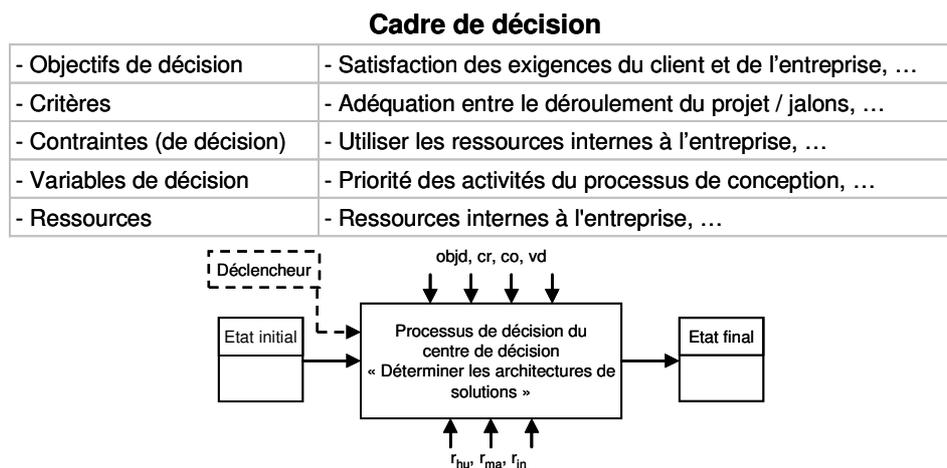


Figure 92 : Processus de décision du centre de décision « Déterminer les architectures de solutions ».

Le transfert interniveaux de spécifications projet dans le processus de décision consiste à affecter le contenu du cadre de décision vers les supports des activités élémentaires : voir figure 93. La description, à un niveau de détail plus élevé, est fournie par la figure 94. Cette description sera détaillée dans les paragraphes suivants. Le processus de décision à un niveau de détail plus fin (voir figure 94) est suffisamment générique pour décrire le fonctionnement des centres de décision. Les données d'entrées et les informations étant différentes, d'un centre de décision à un autre, les données de sorties seront différentes, ce qui permet de distinguer le rôle de chaque centre de décision. Ce processus est adapté d'un processus de décision présenté par Eynard [Eynard, 99]. Nous avons substitué la notion de complétude, initialement intégrée dans le processus de décision, par des indicateurs de performance projet car la complétude d'un projet est difficilement mesurable.

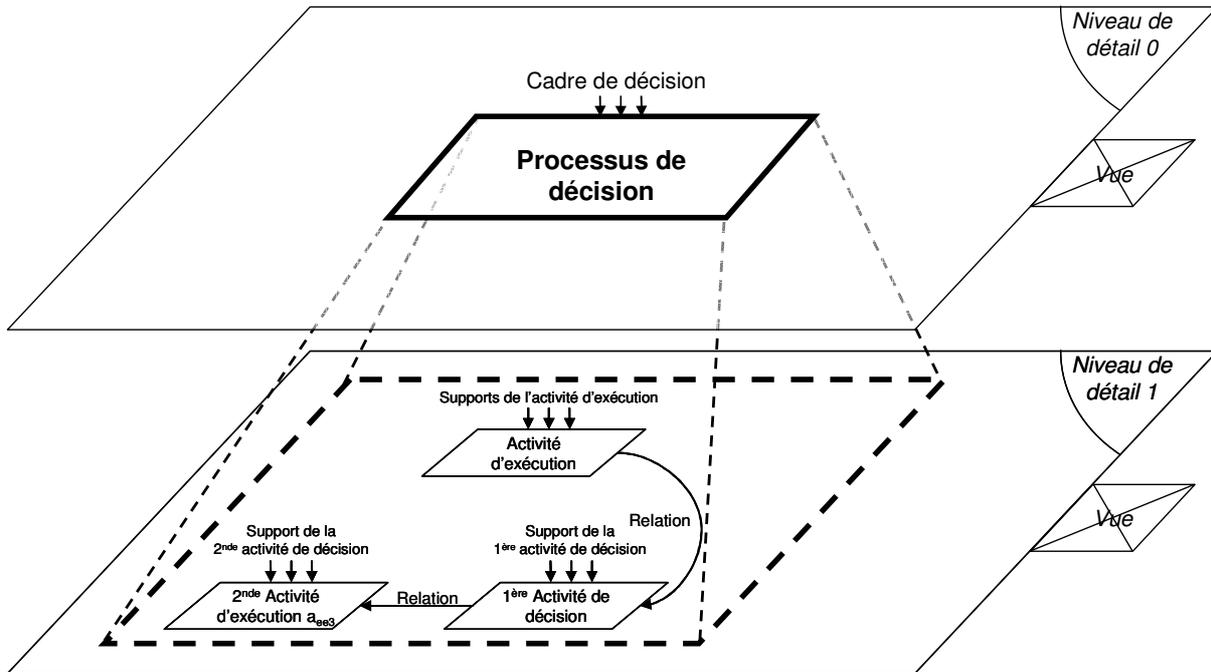


Figure 93 : Transfert interniveaux de spécifications projet dans le processus de décision

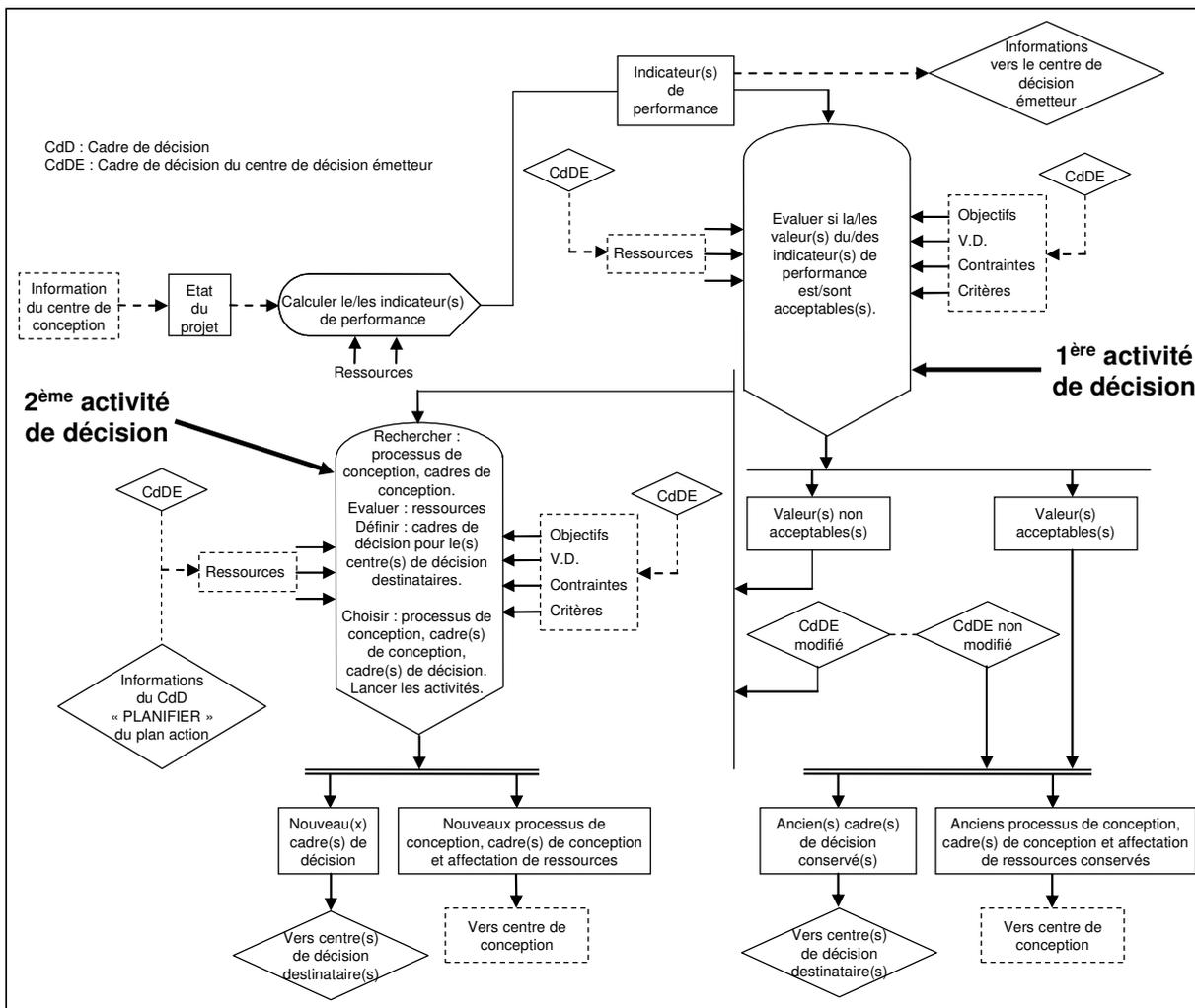


Figure 94 : Détail du processus de décision « généralisé » adapté de [Eynard, 99].

5.1.3.1 Activité d'exécution

L'activité d'exécution permet de calculer le ou les indicateurs de performance du projet. Ces indicateurs sont basés sur des informations (spécifications) du projet c'est-à-dire du produit, des processus de décision et de conception ainsi que de l'organisation (gestion des projets, des ressources, etc.). Ils peuvent donc être qualifiés d'indicateurs de performance projet. L'agrégation de ces informations peut s'appuyer sur les mécanismes de transferts de spécifications présentés dans les paragraphes précédents. Mieux maîtrisée, cette agrégation permet d'obtenir des indicateurs plus précis et prenant en compte la variabilité des informations. Cette activité ne nécessite que des ressources et peut être plus ou moins automatisable.

5.1.3.2 Première activité de décision

La première activité de décision permet d'établir si les valeurs des indicateurs sont ou non acceptables. Le caractère « acceptable » d'une valeur dépend des objectifs de décision, des contraintes de décision, des critères et des variables de décision attachés à cette activité.

A l'issue de cette activité, deux possibilités sont envisageables : les valeurs sont acceptables ou ne le sont pas.

Si les valeurs sont acceptables et que le cadre de décision du centre de décision émetteur (CdDE) n'a pas changé alors le ou les cadres de conception et le ou les centres cadres de décision à envoyer ne sont pas modifiés : le projet est sur la bonne voie, le ou les processus de conception et le ou les centres de décision n'ont pas à être modifiés.

Si les valeurs ne sont pas acceptables ou que le cadre de décision du centre de décision émetteur (CdDE) a changé alors le ou les cadres de conception et le ou les cadres de décision doivent être modifiés. Ce cas de figure se présente quand le projet n'est pas en bonne voie ou quand les objectifs provenant du centre de décision émetteur ont changé. Le ou les cadres de conception et le ou les cadres de décisions doivent s'adapter aux nouveaux objectifs afin de réorienter les centres (de décision et de conception) dans la bonne direction.

5.1.3.3 Seconde activité de décision

Cette seconde activité de décision permet de rechercher et de choisir le ou les nouveaux cadres de conception et le ou les nouveaux cadres de décision à envoyer respectivement au(x) centre(s) de conception et au(x) centre(s) de décision destinataire(s). Cette activité n'a lieu que si le projet ne respecte pas ses objectifs ou si les objectifs ont changé depuis la dernière évaluation.

On constate que des informations provenant du centre de décision « PLANIFIER » sont nécessaires, en effet, dans les divers cadres (de décision ou de conception), des ressources sont proposées et en particulier les ressources humaines. Au moment de prendre les décisions, certaines ressources ont été retenues. Cela ne présage pas de leur « utilisation » future mais les décideurs disposent de suffisamment de ressources pour choisir parmi elles.

5.1.3.4 Conclusion

Ce processus de décision a deux objectifs :

- définir un ou plusieurs cadres de décisions,
- définir un ou plusieurs cadres de conception.

Nous avons décrit les différentes étapes qui conduisent ou non à la définition d'un ou plusieurs nouveaux cadres de conception. Si malgré les modifications, le projet n'atteint toujours pas ses objectifs alors il est possible d'identifier si le problème provient du produit, du processus de conception, du processus de décision et/ou de l'organisation.

La traçabilité y est assurée pour les spécifications techniques mais, plus généralement, pour les spécifications projet. En effet, les activités de décision du processus de décision prennent en compte :

- les aspects techniques en considérant l'état du projet qui inclut intrinsèquement la performance du produit,
- les aspects de type processus, puisque l'avancement du projet est évalué
- les aspects organisationnels avec la gestion des projets et des ressources.

L'aspect organisationnel est pris en compte dans la structure GRAI R&D. Le paragraphe suivant présente cet aspect pour l'exemple traité par l'intermédiaire d'une représentation graphique : la grille GRAI R&D.

5.1.4 Description de l'environnement organisationnel

L'organisation de l'entreprise est représentée par une grille GRAI R&D. Cette grille montre les différentes fonctions décisionnelles pour un projet particulier. Il y a donc autant de grilles que de projets ayant lieu en parallèle dans l'entreprise. Nous ne considérerons la problématique des transferts que dans une vision mono-projet.

La grille présentée dans les prochains paragraphes ne correspond pas à l'organisation d'une entreprise particulière. Les fonctions de l'entreprise ont été volontairement réduites aux fonctions d'un bureau d'études et d'un bureau des méthodes. Dans le secteur automobile ou aéronautique, le nombre de fonctions peut être plus important. La réalisation de la grille est alors plus complexe car basée sur des interviews et des informations *in situ*.

5.1.4.1 Description générale de la grille GRAI R&D associée au scénario

La figure 95 représente une grille GRAI R&D relativement générique. Dans le plan objet, spécifique à chaque projet, les deux fonctions décisionnelles principales sont « Concevoir Etudes » et « Concevoir Méthodes » faisant référence respectivement au bureau d'études et au bureau des méthodes.

Chacune de ces fonctions décisionnelles est associée à deux autres fonctions : « Gérer les connaissances produit/processus » et « Gérer les besoins » formant ainsi deux ensembles de trois fonctions. Le nombre de niveaux décisionnel est classiquement constitué de trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel.

Dans le plan action, commun à tous les projets, la fonction principale est « Planifier ». Cette fonction est également associée aux deux fonctions : « Gérer les informations des projets » et « Gérer les ressources » créant un nouvel ensemble de trois fonctions.

De part et d'autres de la grille, se trouve les informations internes et externes à l'entreprise. Les liens informationnels envoyés ou reçus par ces fonctions n'ont pas été représentés afin d'améliorer la lisibilité de la grille GRAI R&D.

5.1.4.2 Description du centre de décision associé au bureau d'études au niveau tactique

Dans les paragraphes précédents, l'évolution des états du produit ainsi que le processus de conception permettant cette évolution ont été définis. Le processus de conception reçoit d'un centre de décision un cadre de conception lui permettant d'exécuter les activités dans le centre de conception. Ce centre de décision est désigné dans la figure 95 par un rectangle situé au cœur de la grille. Il est piloté par un centre de décision à un niveau stratégique et pilote à son tour des centres de décisions dont deux sont au même niveau décisionnel et un se situe au niveau opérationnel.

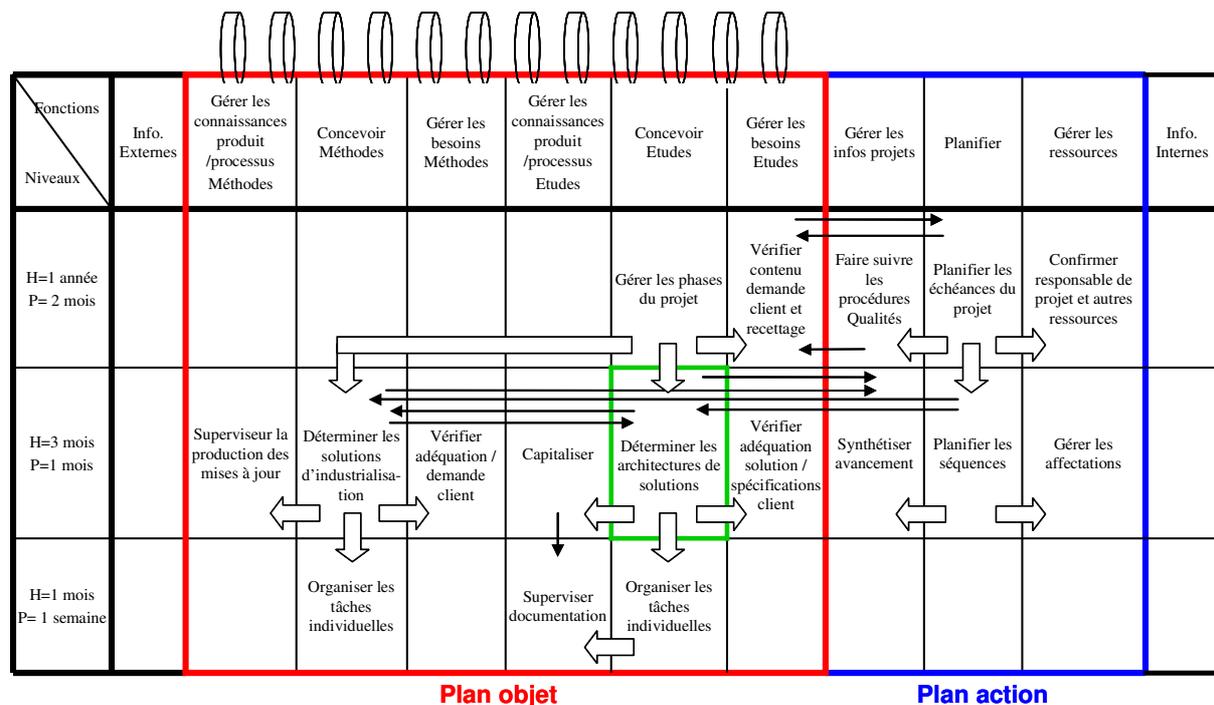


Figure 95 : Grille GRAI R&D associée au scénario de conception.

Le cadre de décision reçu par le centre de décision « Déterminer les architectures de solutions » est obtenu par un transfert de spécifications interniveaux (cf. chapitre 4). La formulation de ce cadre ne sera pas décrite, par contre, nous détaillerons comment ce cadre va être transféré.

Le centre de décision « Déterminer les architectures de solutions » reçoit donc des objectifs de décision, des contraintes de décisions, des critères et des variables de décision. Ces spécifications sont utilisées dans le processus de décision et représentées par des losanges indiquant CdDE (Cadre de Décision du centre de décision Emetteur) : voir figure 94.

Elles conditionnent les cadres de conception et les cadres de décision qui devront être envoyés à l'issue du processus de décision.

Ce centre de décision, par l'intermédiaire du processus de décision, réalise trois transferts de spécifications : deux transferts intervenus et un transfert interniveaux. Ces transferts sont décrits dans les prochains paragraphes.

5.1.4.3 Transfert de spécifications intervenus entre le centre de décision et le centre de conception

Le premier transfert de spécifications considéré est un transfert intervenus entre le centre de décision et le centre de conception. L'objectif est de corréler les spécifications projet du cadre de décision en spécifications dans le cadre de conception. Cette corrélation est obtenue par le processus de décision. En utilisant le formalisme du chapitre 4, on obtient la figure 96.

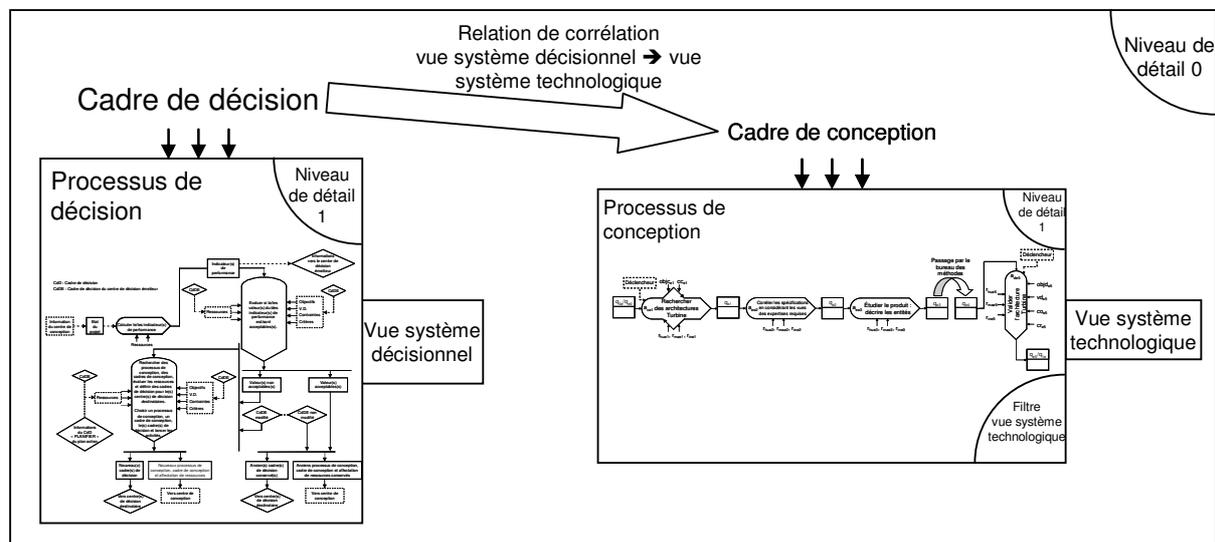


Figure 96 : Transfert de spécifications intervenus entre le système décisionnel et le système technologique.

Cette transformation ne peut être réalisée que par une personne ou un groupe de personne capable de définir un cadre de conception à partir d'un cadre de décision. Par exemple, la satisfaction des fonctions du cahier des charges dans le cadre de conception répond à la partie technique des exigences du client et de l'entreprise dans le cadre de décision. Un simple filtrage peut suffire lorsque, par exemple, un objectif technique est spécifié par le client, ce qui est le cas dans notre scénario puisque les acheteurs de turbomachines choisissent celles ayant des caractéristiques techniques précises comme une puissance minimum, un encombrement, etc. Par contre, seule l'expérience de l'entreprise permet de savoir quel processus de conception et quelles ressources mettre en œuvre pour atteindre ces caractéristiques considérées par l'entreprise comme des objectifs.

Dans notre exemple, le résultat de ce transfert permet de définir les spécifications du cadre de conception fourni dans la figure 84 à partir du cadre de conception fourni dans la figure 92.

5.1.4.4 Transfert intervues de spécifications projet entre centres de décision

Le transfert de spécifications entre d'une part le centre de décision « Déterminer les architectures de solutions » et d'autre part les centres de décision « Capitaliser » et « Vérifier adéquation solution / spécifications client » est un transfert intervues. Ce transfert est représenté dans la figure 97.

Ce transfert a lieu dans le système décisionnel. Le but de ce transfert est de fournir à des centres de décision des cadres de décision afin que ceux-ci puissent exécuter leur propre processus de décision. Une nouvelle fois, il peut s'agir parfois d'un filtrage des spécifications. Par exemple, si l'entreprise impose une contrainte d'utilisation de solutions existantes, alors le centre de décision « Déterminer les architectures de solutions » fournira au centre de décision « Capitaliser » le cadre de décision permettant de respecter cette contrainte. En retour, le centre de décision émetteur reçoit des informations indiquant si des solutions existantes peuvent être utilisées ou non.

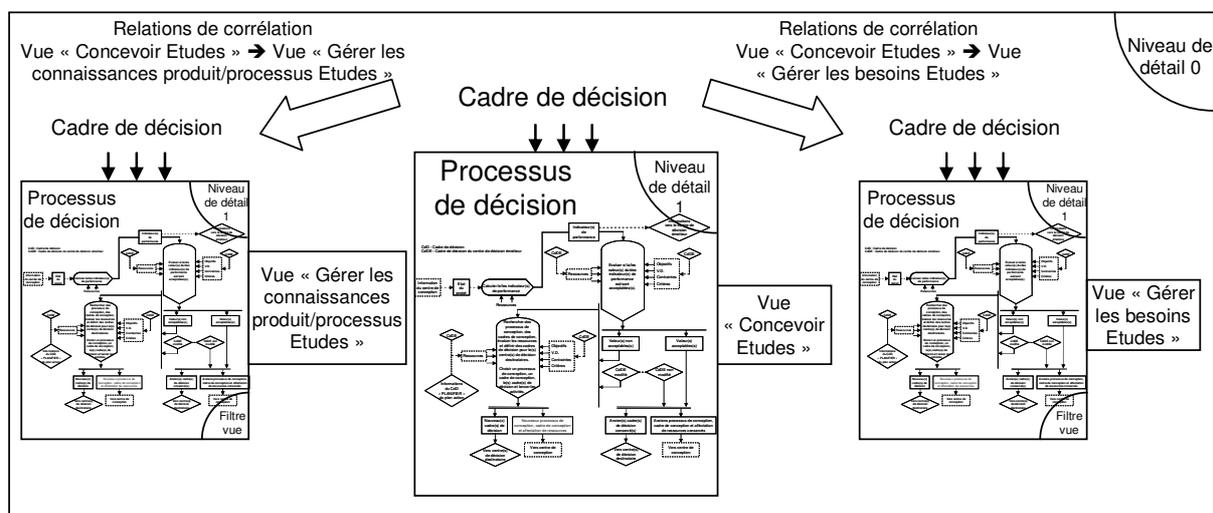


Figure 97 : Transfert de spécifications intervues entre centres de décisions.

5.1.4.5 Transfert interniveaux de spécifications projet entre centres de décision

Le dernier transfert de spécifications lié au centre de décision « Déterminer les architectures de solutions » est un transfert interniveaux vers le centre de décision « Organiser les tâches individuelles ».

Ce transfert de spécifications permet d'établir le cadre de décision nécessaire au processus de décision dans le centre de décision destinataire. L'objectif est de transférer les informations d'un cadre de décision vers un nouveau cadre de décision. Ce transfert peut être illustré par la figure 98.

Si les objectifs du centre de décision destinataire sont atteints alors une partie des objectifs du centre de décision émetteur seront également atteints. La non-satisfaction des objectifs peut provenir d'un problème lié au transfert, comme une décomposition incorrecte des objectifs.

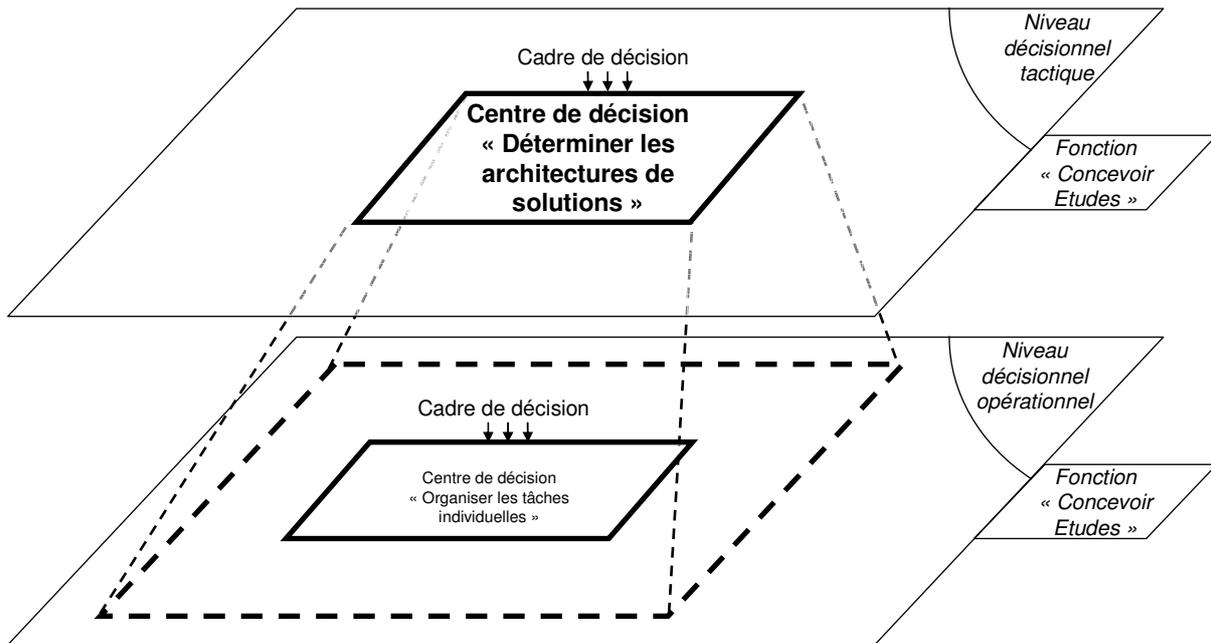


Figure 98 : Transfert interniveaux de spécifications projet entre centres de décisions.

5.1.5 Conclusion

Le scénario de conception a été complètement décrit dans l'environnement PPO retenu. Les mécanismes de transferts de spécifications ont été mis en évidence dans chaque modèle et entre les modèles.

La figure 99 présente une vision globale de l'environnement PPO appliqué au scénario de conception présenté dans les précédents paragraphes. Cette vision permet de se rendre compte du cheminement des spécifications (i.e. de la traçabilité) de l'organisation jusqu'au produit.

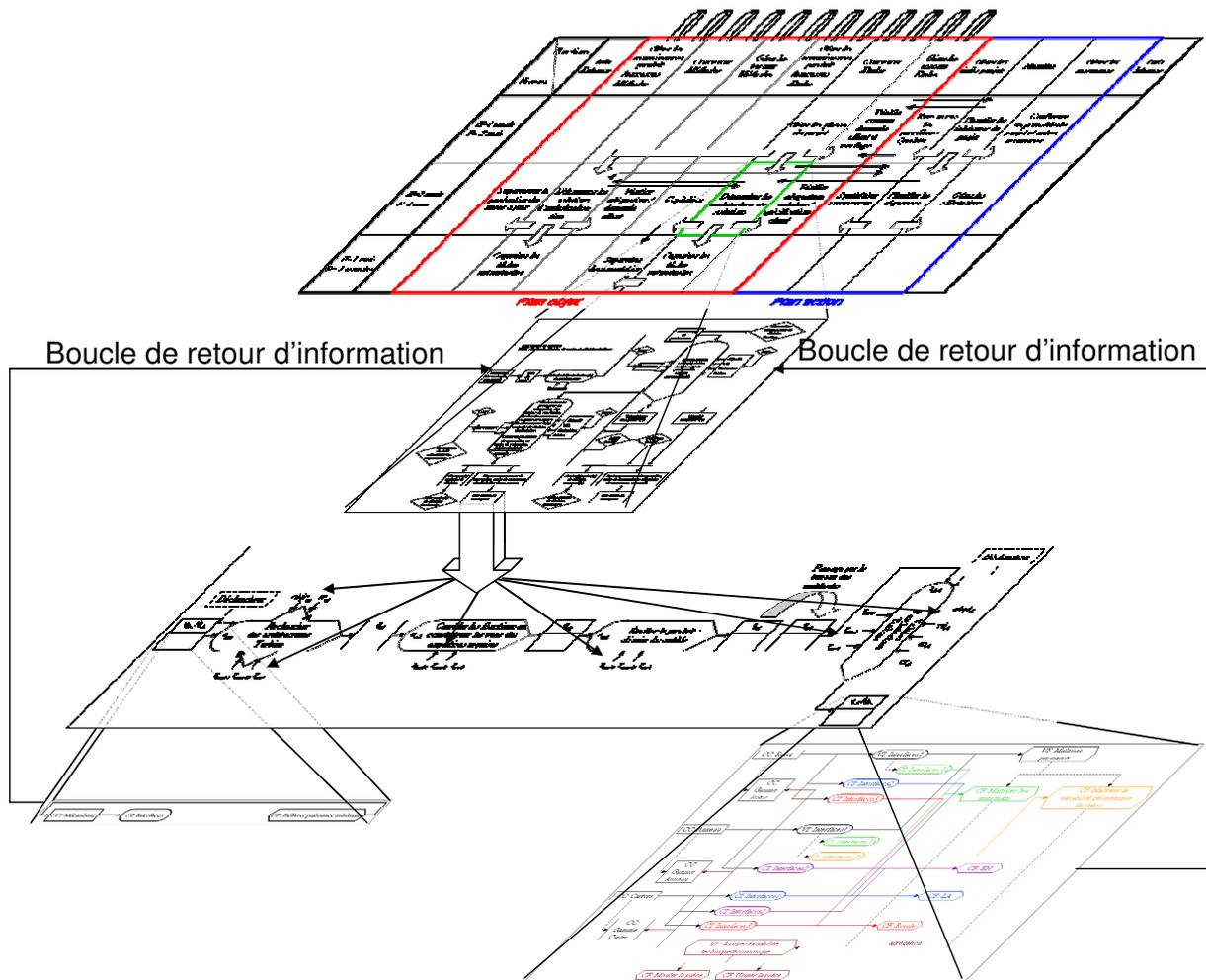


Figure 99 : Environnement PPO appliqué au scénario de conception.

Les prochains paragraphes vont présenter l'impact de perturbations simulées dans le système technologique.

5.2 Simulations de perturbations

L'étude se focalisera sur un centre de décision particulier situé à un niveau décisionnel tactique à savoir le centre de décision « Déterminer les architectures de solutions » (encadré sur la figure 95).

Deux expertises métiers sont considérées : l'expertise tolérancement géométrique et l'expertise thermomécanique. Ce choix se justifie par l'importance de ces expertises au regard d'un objectif de rendement énergétique à respecter. En effet, elles permettent d'obtenir des résultats suffisamment pertinents pour aider à choisir parmi plusieurs solutions d'architectures. Des travaux dédiés à l'influence des variations géométriques d'un anneau de turbine haute pression sur son rendement énergétique sont actuellement en cours [Pierre *et al.*, 09].

Cette partie présente la résolution de problèmes apparaissant dans le cycle de conception en fonction de quatre perturbations envisagés :

- perturbation technique dans le bureau d'études,
- perturbation technique dans le bureau des méthodes,
- perturbation de type processus dans le bureau d'études,
- perturbation organisationnelle dans le bureau d'études.

Ces perturbations sont volontairement découplées afin de mettre en évidence quels types de solutions peuvent être envisagés. Les solutions présentées sont suffisamment génériques pour résoudre, dans le cycle de conception, des problèmes académiques.

L'étude de la résolution des problèmes générés par ces perturbations a pour objectif de montrer l'exploitation des liens de traçabilité des spécifications projet formalisés par les transferts présentés dans le chapitre 4.

La figure 100 décrit le pilotage d'un centre de conception par un centre de décision. Le processus de décision est celui présenté figure 94. A l'issue de ce processus de décision, seuls le cadre de conception et le plan d'activité sont pris en compte (présentés figure 84). Les problématiques liées aux informations entre centres de décision et à la gestion de plusieurs projets ne sont pas abordées.

Une partie du contenu du cadre de conception ainsi que le plan d'activité (sous sa forme « compacte ») est présenté dans la figure 100. Le contenu du cadre de conception ainsi que le plan d'activité est décrit plus en détail dans la figure 84.

Le processus de conception considéré est celui décrit dans les paragraphes 5.1.1 et 5.1.2.

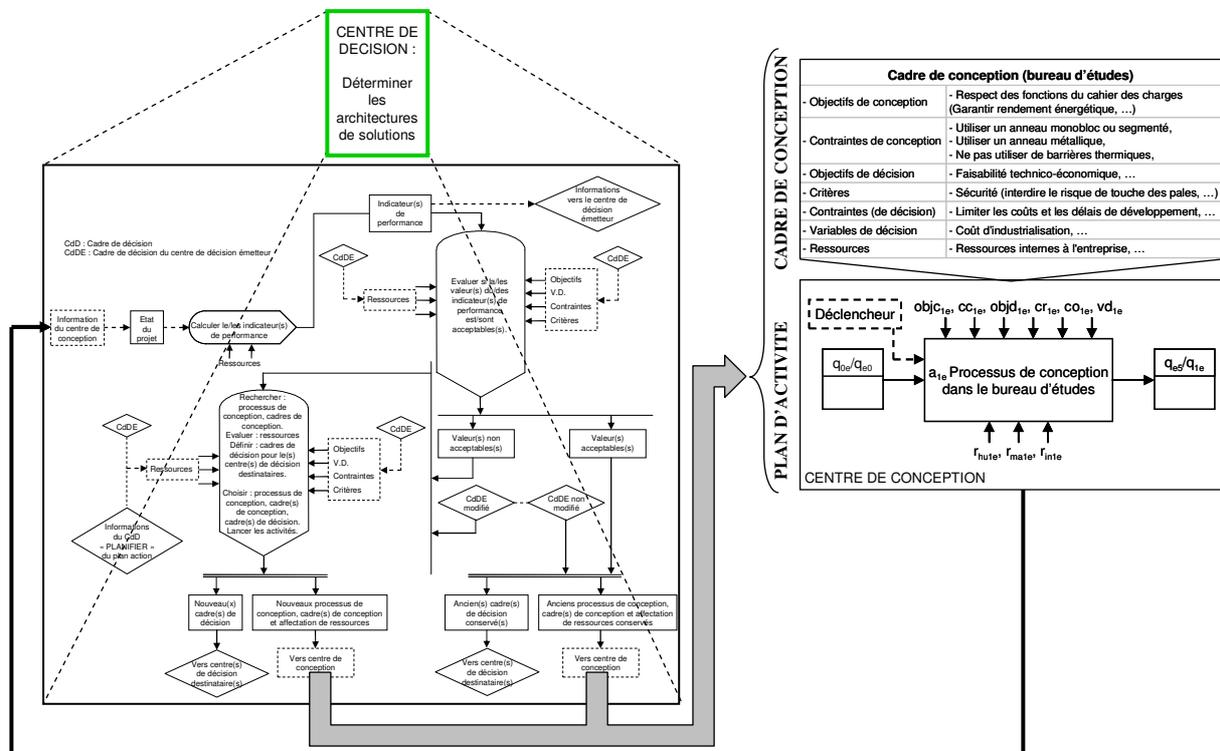


Figure 100 : Pilotage du centre de conception (bureau d'études) par le centre de décision.

5.2.1 Perturbation de type technique dans le bureau d'études

La première perturbation envisagée est introduite dans le bureau d'études. Cette perturbation est de type technique c'est-à-dire liée uniquement au produit. Nous considérons que la caractéristique non maîtrisée correctement est le rendement énergétique.

5.2.1.1 Apparition de la perturbation

Pendant le processus de conception, après l'étude de chaque expertise sur les alternatives proposées (i.e. après la deuxième activité d'exécution) une perturbation de type technique apparaît sur les solutions obtenues. Dans le processus de conception dans le bureau d'études, le problème généré par cette perturbation apparaît à l'état du modèle produit q_{e3} : voir figure 101. En effet, la détermination d'au moins une des spécifications mises en place par l'expert tolérancement géométrique, par exemple SP3, a montré que les solutions ne pouvaient être retenues : voir Annexe 6 et Annexe 8. Le risque de touche des pales est trop important ($J_{rotor/stator} > J_{min}$), par conséquent la valeur du rendement énergétique, quelle qu'elle soit, n'est pas réaliste.

Le centre de décision détecte, par retour d'informations (figure 100), que le produit ne respecte pas ses objectifs. Le calcul de l'indicateur de performance énergétique dans l'activité d'exécution de la figure 100 renvoie la valeur non-conforme à cause du rendement énergétique. Cette valeur est considérée comme non acceptable par le centre de décision.

En utilisant la modélisation GRAI R&D, la résolution de ce problème issu d'une perturbation de type technique passe par la modification du cadre de conception et du plan d'activité (i.e. du processus de conception). Pour ce faire, le centre de décision peut utiliser certains leviers d'action (i.e. les variables de décision) qui permettent d'agir sur le produit, le processus de conception et/ou l'organisation du projet.

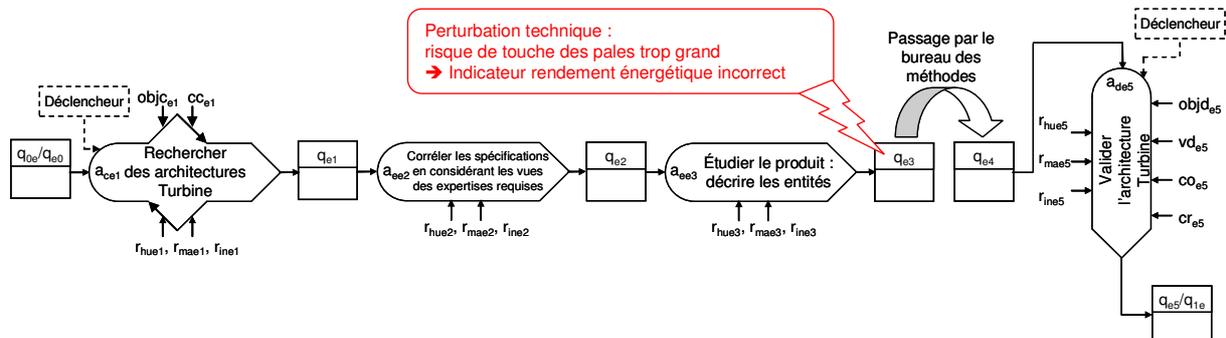


Figure 101 : Apparition d'une perturbation de type technique lors du processus de conception.

5.2.1.2 Résolution d'un problème issu d'une perturbation technique dans le bureau d'études

Dans ce cas très précis la modification du plan d'activité (i.e. du processus et/ou de l'organisation) est inefficace car la perturbation est de type technique. En changeant le processus de conception ou en affectant plus de ressources, le problème généré par la perturbation persistera toujours. Le centre de décision ne peut donc qu'agir sur le cadre de conception en modifiant certaines spécifications liées au produit.

La résolution d'un problème issu d'une perturbation de type technique peut passer par la suppression de la contrainte « Ne pas utiliser de barrières thermiques » : voir figure 102. Cette suppression permet d'envisager des solutions initialement écartées. S'il existe une solution mettant en œuvre une barrière thermique dont le risque de touche est acceptable alors l'indicateur de performance devient conforme.

Cadre de conception (bureau d'études)

- Objectifs de conception	- Respect des fonctions du cahier des charges (Garantir rendement énergétique, ...)
- Contraintes de conception	- Utiliser un anneau monobloc ou segmenté, - Utiliser un anneau métallique, - Ne pas utiliser de barrières thermiques;
- Objectifs de décision	- Faisabilité technico-économique, ...
- Critères	- Limiter le coût d'industrialisation et/ou de sous-traitance, ...
- Contraintes (de décision)	- Limiter les coûts et les délais de développement, ...
- Variables de décision	- Coût d'industrialisation, ...
- Ressources	- Ressources internes à l'entreprise, ...

Figure 102 : Nouveau cadre de conception proposé par le centre de décision.

5.2.2 Autre perturbation technique dans le bureau des méthodes

La deuxième perturbation envisagée est introduite cette fois-ci dans le bureau des méthodes. Cette perturbation est également de type technique c'est-à-dire uniquement liée au produit. Elle génère un problème lié à la conception et plus précisément un problème lié à l'industrialisation. Seules les expertises fonderie et usinages seront envisagées dans le processus d'industrialisation. Ce choix se justifie par la réalité des moyens de production employés par les fabricants de turbomachines. Nous ferons l'hypothèse que l'entreprise possède son propre système de production et qu'elle privilégie par conséquent la production des pièces en interne.

5.2.2.1 Apparition de la perturbation

Pendant le processus d'industrialisation, après l'étude des expertises fonderie et usinage (i.e. après la deuxième activité d'exécution) une perturbation de type technique apparaît sur les solutions d'industrialisation : voir figure 103. Pour une production en interne, les solutions envisagées par les experts ne satisfont pas les spécifications imposées à cause des capacités de moyens de production. La valeur réelle du rendement énergétique sera de fait inférieure aux prévisions évaluées en bureau d'études. Elle risque de passer en dessous de l'objectif.

Le centre de décision « Déterminer les solution d'industrialisation » (voir figure 95) est informé par retour d'informations que le rendement énergétique du produit ne convient pas. Le calcul de l'indicateur de performance énergétique dans le processus de décision renvoie la valeur non-conforme, valeur considérée comme non acceptable.

Cette perturbation nécessite d'apporter des modifications soit sur la capacité des machines (investissement sur des machines plus performantes par exemple) soit sur les spécifications du produit afin de s'adapter aux machines existantes. Si cette dernière solution est retenue, le centre de décision, associé au processus de conception de la figure 103, ne peut

pas imposer directement de modifications sur les spécifications issues du bureau d'études. D'après la grille GRAI R&D (figure 95), ce centre de décision doit en informer le centre de décision « Gérer les phases du projet » situé à un niveau stratégique. Ce centre de décision pourra alors imposer au centre de décision « Déterminer les architectures de solutions » de modifier le cadre de conception et ainsi modifier les spécifications du bureau d'études.

L'environnement PPO retenu pour le scénario doit permettre d'éviter aux acteurs d'agir sur le produit ou sur le projet si ceux-ci n'en n'ont pas l'autorisation.

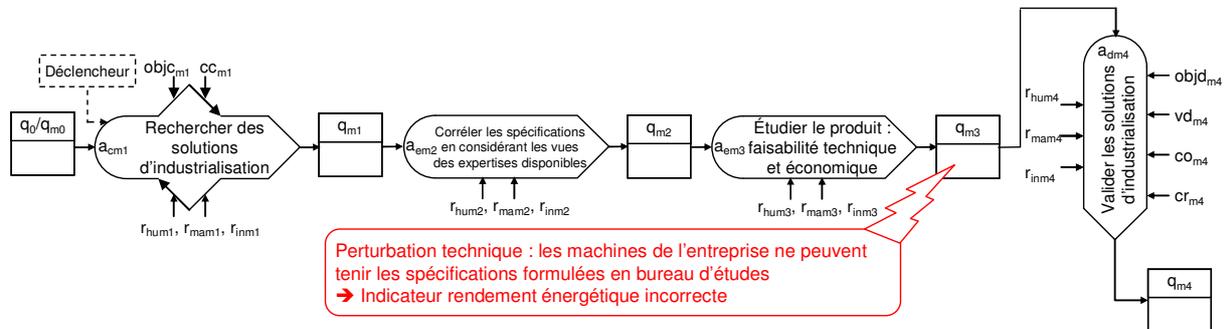


Figure 103 : Apparition d'une perturbation de type technique lors du processus d'industrialisation.

5.2.2.2 Résolution d'un problème issu d'une perturbation technique dans le bureau des méthodes

Une nouvelle fois, il s'agit d'un problème issu d'une perturbation de type technique où la modification du processus de conception et/ou de l'organisation du projet est inefficace. Le centre de décision étudié ne peut agir que sur le cadre de conception du centre de conception dont il a la charge.

La résolution de ce problème peut passer par :

- la modification d'une contrainte de conception « Utiliser les moyens de production internes » en « Utiliser les moyens de production internes ou externes » : voir figure 104. Cette modification permet d'envisager la fabrication avec des machines qui ne sont pas détenues par l'entreprise,
- l'envoi d'information au centre de décision émetteur « Gérer les phases du projet » qui enverra un nouveau cadre de décision au centre de décision « Déterminer les architectures de solutions ». Ce dernier devra alors modifier les spécifications sur les pièces pour qu'elles puissent être réalisées avec les moyens de production externes.

Cadre de conception (bureau des méthodes)

- Objectifs de conception	- Respect des fonctions du cahier des charges (Garantir rendement énergétique, ...)
- Contraintes de conception	- Utiliser les moyens de production internes ou externes , ...
- Objectifs de décision	- Faisabilité technico-économique, ...
- Critères	- Limiter le coût d'industrialisation et/ou de sous-traitance, ...
- Contraintes (de décision)	- Limiter les coûts et les délais de développement, ...
- Variables de décision	- Coût d'industrialisation, ...
- Ressources	- Ressources internes à l'entreprise, ...

Figure 104 : Nouveau cadre de conception proposé par le centre de décision (bureau des méthodes).

5.2.3 Perturbation de type processus dans le bureau d'études

La troisième perturbation envisagée est introduite dans le bureau d'études. Cette perturbation est de type processus c'est-à-dire liée au processus de conception. Elle permet de mettre en œuvre la modification du plan d'activité.

5.2.3.1 Apparition de la perturbation

Pendant le processus de conception, l'étude de chaque expertise sur les alternatives proposées s'avère trop importante en termes de délais : voir figure 105. L'estimation du délai de développement augmente jusqu'à dépasser une valeur limite.

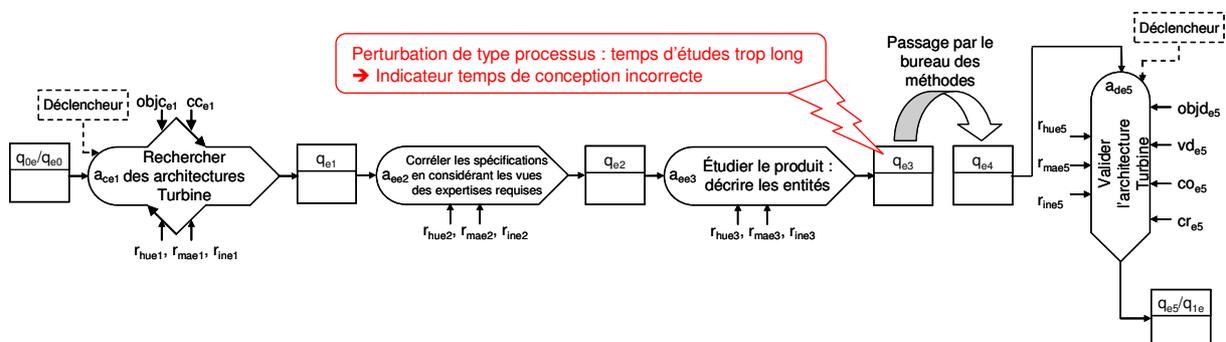


Figure 105 : Apparition d'une perturbation dans le processus de conception.

Le centre de décision vérifie, à périodes régulières, l'état d'avancement du projet. Le calcul de la performance énergétique renvoie une valeur non-conforme à cause de l'estimation du délai de développement. Cette non-conformité de l'indicateur est déclarée non acceptable par le centre de décision qui doit apporter des modifications au cadre de conception ou au plan d'activité.

5.2.3.2 Résolution d'un problème issu d'une perturbation de type processus

La résolution du problème issu de la perturbation mise en place peut être obtenue en agissant sur le processus de conception (i.e. le plan d'activité) et/ou la gestion des ressources. La modification du cadre de conception ne permet pas de réduire le temps de développement.

Rappelons que pour améliorer la lisibilité, le processus de conception figure 105 est représenté, pour l'étude des solutions, avec une seule activité d'exécution mais que plusieurs activités se déroulent simultanément. Le centre de décision peut imposer d'écarter certaines alternatives de solution réduisant la quantité d'études à réaliser par les acteurs. Les solutions écartées peuvent par exemple être celles qui sont trop innovantes ou incertaines. En se concentrant sur des solutions déjà éprouvées, l'entreprise peut estimer pouvoir reprendre le contrôle sur le délai de développement.

Une deuxième solution envisageable est d'affecter plus de ressources sur les activités d'exécution afin que toutes les solutions envisagées soient traitées jusqu'à leur terme.

Cette dernière solution ne peut que faire augmenter le coût de développement. Or, la performance énergétique dépend de l'estimation de ce coût. Ainsi, la réduction du temps de développement pour répondre à la perturbation engendre l'augmentation de son coût. L'entreprise doit chercher un compromis permettant de rester dans une valeur acceptable de l'indicateur de performance en jouant sur deux caractéristiques à la fois.

5.2.4 Perturbation organisationnelle dans le bureau d'études

La dernière perturbation envisagée est introduite dans le bureau d'études. Cette perturbation, de type organisation, est liée à la gestion des ressources et en particulier les ressources humaines.

5.2.4.1 Apparition de la perturbation

Pendant le processus de conception, une perturbation organisationnelle apparaît durant l'activité d'exécution « Etudier le produit » : voir figure 106.

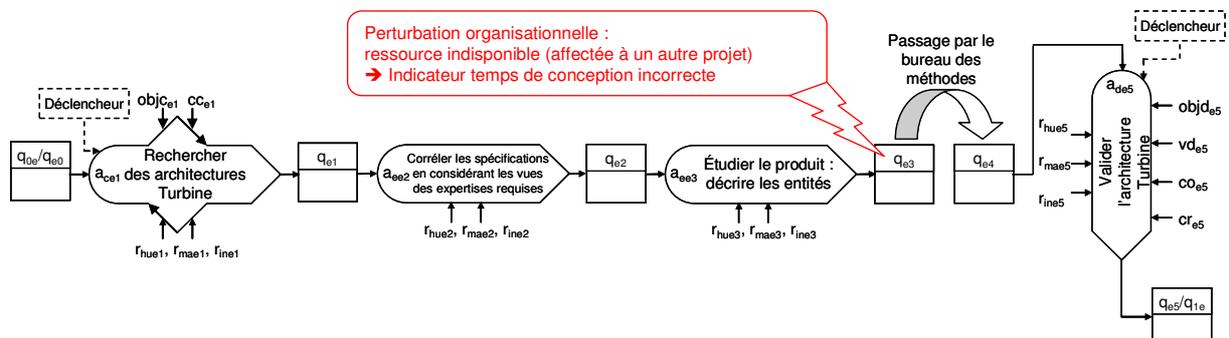


Figure 106 : Apparition d'une perturbation organisationnelle lors du processus de conception.

Des acteurs de la conception (i.e. ressources humaines) ne sont plus disponibles. L'origine de cette non-disponibilité peut être multiple, et provoque sur l'estimation du délai de développement une augmentation de la valeur objectif. Le calcul de l'indicateur de

performance énergétique dans le processus de décision indique une valeur non-conforme. Les acteurs du centre de décision estiment que cette valeur n'est pas acceptable. Ils doivent donc modifier le cadre de conception et/ou le processus de conception. *A priori*, la modification du cadre de conception ne permet pas d'apporter de solutions pour modifier favorablement la perturbation mise en place. Les décideurs s'orientent par conséquent sur une modification du plan d'activités.

5.2.4.2 Résolution d'un problème issu d'une perturbation organisationnelle

Trois solutions peuvent être proposées pour résoudre le problème issu de cette perturbation :

- modifier le processus de conception, en écartant l'étude de certaines solutions (les plus innovantes, les plus risquées) afin de réduire la charge de travail des acteurs encore disponibles,
- modifier le processus de conception, en sous-traitant une partie de l'activité « étudier le produit »,
- remplacer la ou les ressources manquantes par une ou plusieurs autres ressources internes ou externes à l'entreprise.

La première solution oblige l'entreprise à ne pas approfondir le développement de certaines solutions. Cette stratégie peut s'avérer dommageable à moyen ou long terme car les solutions écartées peuvent s'avérer intéressantes dans le futur.

La deuxième solution implique d'une part une augmentation du coût de développement en rémunérant des personnes initialement non prévues dans le projet et d'autre part la mise en place d'une logistique pour le transfert des données. De plus, en sous-traitant, il faut modifier le cadre de conception pour autoriser l'utilisation de ressources externes à l'entreprise.

La dernière solution paraît la plus triviale mais il faut prendre en considération que les ressources humaines ne sont pas complètement interchangeables. Deux acteurs, ayant les mêmes compétences, ont des particularités (capacité de travail, intégration à une équipe, etc.) qui rejaillissent sur le résultat de leur travail. Comme pour la solution précédente, une modification du cadre de conception est nécessaire afin d'autoriser l'utilisation de ressources externes alors qu'initialement seules les ressources internes sont envisagées.

5.2.5 Synthèse

La mise en place d'une perturbation de type technique dans le bureau d'études ou le bureau des méthodes permet de montrer l'intérêt des mécanismes de transferts de spécifications. Dans les deux premières perturbations considérées, il est possible de connaître quelles fonctions du produit sont impactées par la perturbation et quels effets indésirables vont être introduits par des modifications.

Dans la première perturbation, en utilisant la traçabilité des spécifications, le problème sur la spécification SP3 impacte le critère « jeu rotor/stator » qui lui-même impacte la fonction de service du mécanisme étudié : voir figure 107.

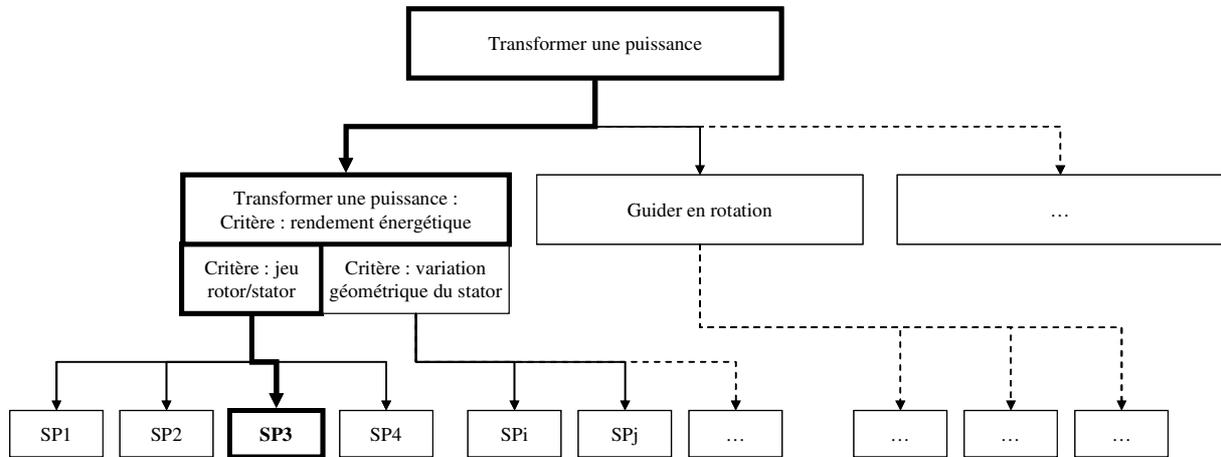


Figure 107 : Traçabilité des spécifications impactées par SP3.

Dans la dernière perturbation, en utilisant la traçabilité des spécifications, les répercussions sur le projet dues à l'absence d'une ressource humaine peuvent être représentées : voir figure 108.

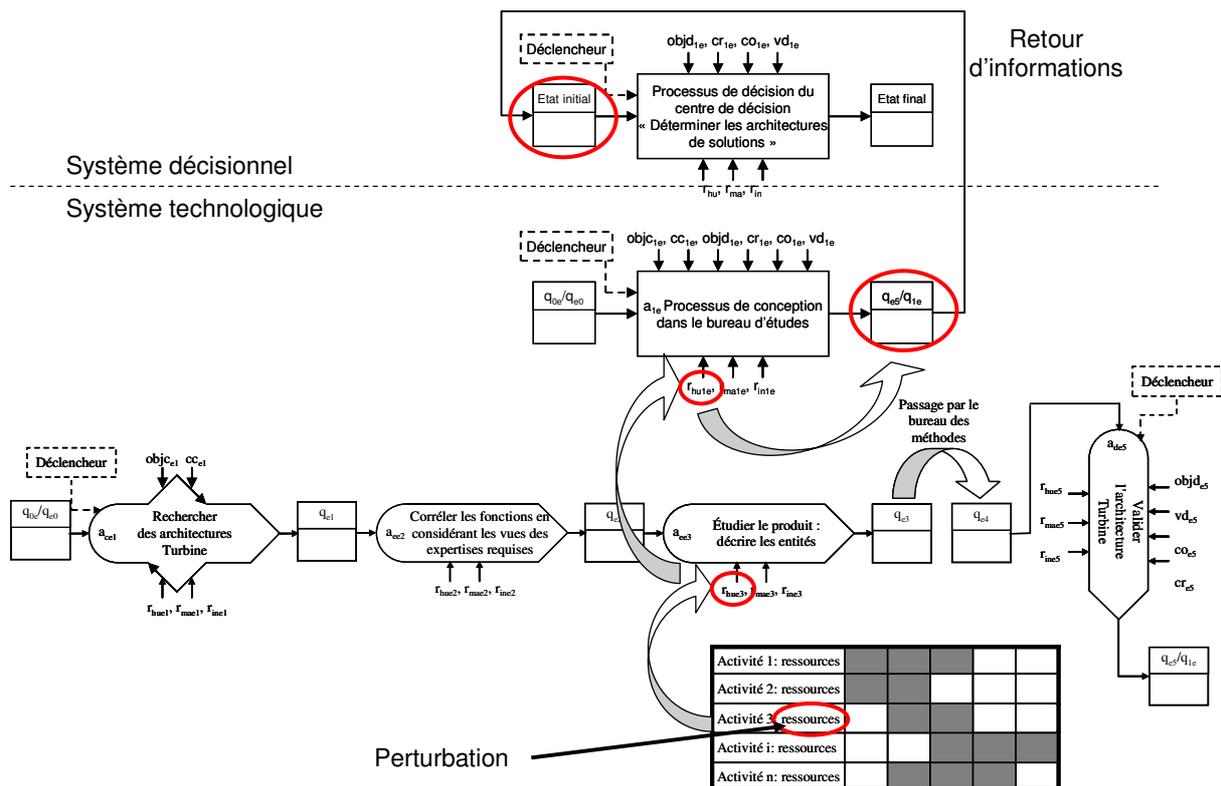


Figure 108 : Traçabilité des spécifications impactées par l'absence de ressources d'une activité.

Les modifications apportées au projet pour résoudre les problèmes issus des perturbations doivent permettre de respecter les objectifs fixés. L'évaluation de l'état du projet se fait par l'intermédiaire d'indicateurs de performance projet. Nous avons retenu l'indicateur de performance énergétique pour évaluer l'adéquation entre le rendement

énergétique du produit, le coût de développement et le délai de développement. Nous avons mis en évidence que certaines solutions permettent d'améliorer une de ces caractéristiques au détriment d'une autre. L'entreprise, par l'intermédiaire de ces décideurs, doit trouver, dans le centre de décision, un compromis permettant la réussite du projet. Les effets indésirables induits doivent pouvoir être anticipés ou au moins tracés grâce à la mise en place d'une plateforme reposant sur l'environnement PPO présenté.

5.3 Conclusion

Ce chapitre a, dans une première partie, décrit, à l'aide des modèles présentés dans le chapitre 3, un scénario de conception de turbine haute pression. Les mécanismes de transferts de spécifications ont été illustrés à l'aide du formalisme développé dans le chapitre 4. Dans une deuxième partie, des perturbations ont été introduites dans le scénario de conception afin d'utiliser les liens de traçabilité des spécifications pour résoudre les problèmes engendrés.

L'évaluation de l'état du projet a été réalisée à l'aide d'un indicateur de performance projet c'est-à-dire prenant en compte des aspects liés au produit, aux processus et à l'organisation. Le résultat de cette évaluation indique aux décideurs si des corrections doivent être apportées et sur quels leviers d'action agir. Les corrections portent essentiellement sur le cadre de conception et le plan d'activité. En modifiant le contenu du cadre de conception, les concepteurs du bureau d'études ou du bureau des méthodes doivent être capables de trouver une solution viable vis-à-vis des objectifs portant sur des caractéristiques techniques. En modifiant le processus de conception, les décideurs agissent sur les caractéristiques liées à la planification et à la gestion des ressources.

La traçabilité des spécifications obtenues par les mécanismes de transferts de spécifications permet de déterminer, en cours de conception, quelles spécifications influencent les indicateurs de performance. L'un des objectifs lié à la traçabilité est de garantir l'efficacité des leviers d'action associés à ces indicateurs. Les mécanismes de transferts ne peuvent indiquer quelles spécifications doivent être modifiées. Le rôle des décideurs est d'utiliser les modèles afin de les aider dans leurs choix.

Ce chapitre a apporté des solutions à des perturbations académiques. Pour envisager des perturbations plus complexes, les mécanismes de transferts doivent faire l'objet d'une implémentation sur une plateforme logicielle de type PPO afin de prendre en compte l'interaction des spécifications. Les exemples présentés ont permis d'illustrer l'intérêt de nos propositions dans un environnement de conception collaborative particulier.

Un scénario de conception de turbine haute pression est décrit et illustré dans l'environnement PPO retenu dans ce travail. La mise en place de perturbations dans ce scénario permet de montrer les bénéfices de la traçabilité des spécifications assurée par les mécanismes de transferts.

Un indicateur de performance énergétique a été défini. Cet indicateur est de type PPO : il prend en compte un aspect technique (le rendement énergétique) et deux aspects liés au processus et à l'organisation de la conception (le coût et le délai de développement). L'utilisation de leviers d'action associés à cet indicateur (modification du contenu du cadre de conception ou du processus de conception) permet d'apporter des solutions aux problèmes académiques provenant de perturbations de différents types.

Conclusion

Avec l'amélioration permanente des capacités de stockage informatiques, la quantité de données à gérer pour concevoir un produit manufacturé a énormément augmenté. Parmi ces données, les spécifications permettent de prendre en considérant les diverses variabilités pour caractériser tout ou partie d'un projet de conception. La traçabilité de ces spécifications est, pour les entreprises, un enjeu capital pour améliorer la performance de ses cycles de conception ainsi que celle des prestations qu'elle propose. La connaissance et la gestion des relations entre les spécifications sont au cœur de la problématique présentée dans ce mémoire car, aujourd'hui encore, elles ne sont toujours pas complètement formalisées. Un autre aspect pris en compte dans ce mémoire à propos des spécifications est qu'elles se trouvent généralement cloisonnées au sein d'une expertise. Les corrélations nécessaires pour permettre aux acteurs d'effectuer correctement leurs tâches ne sont pas non plus toujours formalisées.

Dans le cadre de la conception collaborative, pouvoir formaliser et gérer les relations entre les spécifications par l'intermédiaire de modèles peut s'avérer pertinent. Depuis quelques décennies, de nombreux travaux de recherche sur cette problématique ont débouché sur des modélisations permettant d'intégrer l'ensemble des spécifications. Ces spécifications étaient initialement de type géométrique car, historiquement, les modeleurs géométriques étaient les premiers outils à permettre aux acteurs de travailler ensemble sur la conception d'un produit. Les modèles pour la conception collaborative se sont ensuite orientés vers la prise en compte de spécifications liées à tous les aspects du produit. Toujours dans un souci d'optimisation de la conception, la modélisation des étapes de conception du produit a permis, quant à elle, de déboucher sur l'élaboration de modèle processus permettant de conserver l'historique de la conception. Parallèlement à ces développements, la modélisation de l'organisation d'un système de conception a vu le jour en s'inspirant de travaux, méthodes et outils appliqués qui sont nombreux dans le domaine de la production. Les travaux sur la modélisation pour la conception collaborative sont aujourd'hui relativement nombreux et nous avons fait le choix de ne pas être exhaustifs en ne retenant que ceux qui considèrent au moins deux points aspects de la conception car ils sont mieux à même de pouvoir donner des pistes de réponses à la problématique posée.

Certaines des modélisations présentées et décrites ont été retenues pour pouvoir illustrer les propositions faites dans ce mémoire. Le choix des modèles a été guidé par la nécessité d'avoir des modèles ayant un niveau d'abstraction suffisant pour être généralisable à d'autres

modèles tout en étant suffisamment explicite au niveau de leurs représentations, en particulier graphiques. Le modèle produit retenu est celui issu des travaux d'IPPOP, ce modèle fait parti des plus récemment développés. La modélisation des processus est décrite par l'intermédiaire de GRAI (pour les processus de décision) et GRAI R&D (pour les processus de conception). Ces modèles sont rapidement exploitables dans le contexte de notre problématique. Enfin le modèle organisation GRAI R&D, permet de prendre en compte tous les aspects décisionnels de l'organisation. Peu de modèles organisation pour la conception existent et la double représentation réseaux et grilles GRAI R&D a conduit nos travaux à prendre ces modèles.

Certains développements sur le modèle produit IPPOP a mis en évidence, pour les spécifications géométriques, des mécanismes de transferts. La manipulation des concepts utilisés par les modèles produit, processus et organisation fait apparaître des analogies sur d'autres types de spécifications. Ce mémoire présente des travaux sur la formalisation de ces mécanismes. Le formalisme proposé est suffisamment générique afin de permettre de décrire les mécanismes de transferts pour l'ensemble des spécifications manipulées dans l'ensemble des modèles pour la conception collaborative. Deux types de mécanismes ont été recensés. Le premier type de transfert décrit est le transfert interniveaux qui permet de définir les spécifications d'un objet en fonction du niveau de détail. Le second type de transfert décrit est le transfert intervues. Ce transfert permet de définir les spécifications d'un objet en fonction de la ou les vues considérées. Suivant le point de vue considéré (produit, processus ou organisation), la nature des objets, leurs relations et le contenu des spécifications diffèrent. De même, la définition des niveaux de détails et des vues, ne renvoient pas aux mêmes éléments, voire, dans certains cas, peuvent ne pas avoir de signification. La correspondance entre le formalisme proposé et les modèles retenus est vérifiée *a posteriori*.

Pour améliorer les performances d'un système, celui-ci est tout d'abord évalué par un ensemble d'indicateurs de performance puis corrigé par l'intermédiaire de leviers d'action. L'intérêt de formaliser les mécanismes de transferts repose sur la conservation des relations entre les spécifications permettant leur traçabilité. Cette traçabilité des spécifications permet l'utilisation des leviers d'action plus efficace car les conséquences de leur utilisation sont mieux maîtrisées, qu'elles soient positives ou négatives. Pour évaluer une performance particulière d'un projet de conception de turbine haute pression, un indicateur de performance énergétique a été créé. Cet indicateur est de type PPO car il repose sur des spécifications liées à la fois au produit, au processus et à l'organisation. La mise en place de perturbations dans le système de conception (plus précisément dans le système technologique) est simulée au travers des modèles produit-processus-organisation. Les effets induits par les perturbations ont été analysés et des solutions ont été proposées. En apportant des corrections au système, les couplages entre les spécifications ont été mis en évidence au travers de l'indicateur de performance créé. La notion de compromis en phase de conception permet d'illustrer l'impact des choix décisionnels sur la performance d'un produit et plus généralement sur la performance d'un projet.

Perspectives

Le formalisme présenté dans ce mémoire a été appliqué à un modèle produit, deux modèles processus quasi identiques et un modèle organisation. Pour valider la généralité de ce formalisme, son application à d'autres modèles doit être entreprise dans une démarche de vérification systématique.

Les travaux présentés doivent, à court terme, être mis en place dans une plateforme logicielle de type PPO. Le formalisme proposé peut, *a priori*, être décrit informatiquement dans chaque modèle de conception collaborative. La plateforme logicielle pourrait s'appuyer sur des développements récents en particulier sur la modélisation de l'organisation avec la méthodologie GRAI R&D (PEGASE [Robin, 05]), et sur la modélisation du modèle produit issu d'IPPOP (Open Cascade). Ce dernier a d'ailleurs déjà fait l'objet de nombreux travaux, et certains développements sont relativement avancés avec la recherche de solution à des problèmes concrets ([Sadegui, 08] [Chettaoui, 08]).

La mise en place d'une plateforme devrait permettre :

- d'intégrer des expertises liées au produit autres que celles présentées mais également des expertises liées à d'autres aspects comme le marketing par exemple,
- de consolider l'expérimentation sur plusieurs types de produits,
- de prendre en compte des aspects stratégiques, comme des problèmes économiques par exemple.

La traçabilité des spécifications a été illustrée au travers d'un unique projet de conception. Les liens entre les projets ont été formalisés dans ce mémoire. Seule la mise en place d'une plateforme logicielle pourrait permettre d'aborder des exemples d'applications multiprojets car les informations sont trop hétérogènes et trop nombreuses pour être décrites de manière pertinente.

L'élaboration d'une plateforme peut permettre, à moyen terme, d'envisager une collaboration avec un industriel. Les étapes seraient alors les suivantes :

- description de l'entreprise par le modèle organisation,
- intégration de la plateforme afin de décrire l'entreprise et ses projets,
- phase d'essai et d'expérimentation,
- exploitation sur des projets simples,
- exploitation sur des projets complexes.

L'expérimentation de ce type de plateforme au sein d'une entreprise est très lourde à mettre en œuvre et nécessite de la part des industriels un investissement important. La complexité de l'expérimentation de ce type de plateforme est similaire voire supérieure à celle de l'expérimentation d'un système de gestion de données techniques.

Bibliographie

A

- [AFAV, 94] AFAV, « *Management et démarches de projet – Projet de guide d'intégration des démarches qualité dans la conception de produits* », Association Française pour l'Analyse de la Valeur, 1994.
- [Andreasen, 91] Mogens Myrup ANDREASEN, “*The theory of domains*”, Workshop on Understanding Function and Function to Form Evolution, Université de Cambridge, Royaume-Uni, 1991.
- [Anwer *et al.*, 04] Nabil ANWER, Thomas RAULIN, Luc MATHIEU, « *Méthodologie pour la spécification géométrique des états intermédiaires des pièces fabriquées* », Revue internationale de CFAO et d'infographie, Vol. 18, n°3, pp. 321-336, 2004.
- [Aoussat, 90] Améziane AOUSSAT, « *La pertinence en innovation : nécessité d'une approche plurielle* », Thèse de doctorat, ENSAM Paris, 1990.
- [Arzur *et al.*, 00] Janique ARZUR, Muriel LOMBARD et Alain BERNARD, « *Correspondance entre caractéristiques (entités, feature) pour une application multi-vue, orientée métier, dans un modèle de pièce mécanique* », 3^{ème} Conférence Internationale sur la Conception et la Fabrication Intégrées en Mécanique, proceedings of IDMME'2000 Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Montréal (Canada). Résumé pp. 228, Communication sur CD-Rom, May 2000.

B

- [Ballu *et al.*, 07] Alex BALLU, Jérôme DUFAURE et Denis TEISSANDIER, “*An adaptive tolerance model for collaborative design*”. Digital Enterprise Technology: Perspectives and Future Challenges, Springer US, pp. 233-240, ISBN 978-0-387-49863-8, 2007.

-
- [Ballu *et al.*, 10] Alex BALLU, Jean-Yves DANTAN et Luc MATHIEU, “*Language of tolerancing: GeoSpelling*”, Chapitre 2 de Geometric Tolerancing of Products, Wiley, ISBN 9781848211186, 2010.
- [Ballu et Mathieu, 95] Alex BALLU et Luc MATHIEU, “*Univocal Expression Of Functional And Geometrical Tolerances For Design, Manufacturing And Inspection*”, Computer Aided Tolerancing, ISBN 0-412-72740-4, pp. 31-46, 1995.
- [Berliner et Brimson, 88] Callie BERLINER et James A. BRIMSON, “*Cost management for today’s advanced manufacturing: The CAM.I. Conceptual Design*”, Harvard Business School Press, ISBN 978-0875841977, 1988.
- [Bernard, 00] Alain BERNARD, « *Modèles et approches pour la conception et la production intégrées* », Revue APII-JESA, Vol. 34, pp. 163-193, 2000.
- [Berrah *et al.*, 00] Lamia BERRAH, Gilles MAURIS, Alain HAURAT et Laurent FOULLOY, “*Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach*”, Computers in Industries, Vol. 43, n°3, pp. 211-225, 2000.
- [Berrah *et al.*, 08] Lamia BERRAH, Gilles MAURIS, Jacky MONTMAIN et Vincent CLIVILLÉ, “*Efficacy and efficiency indexes for a multi-criteria industrial performance synthesized by Choquet integral aggregation*”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 21, n°4, pp. 415-425, juin 2008.
- [Bettaieb, 06] Sabeur BATTAEIB, « *Contribution à la spécification d’un environnement de conception collaborative intégrant d’expertises métier hétérogènes* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 23 mars 2006.
- [Bitton, 90] Moïse BITTON, « *ECOGRAI : méthode de conception et d’implantation de systèmes de mesure de performances pour organisations industrielles* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1990.
- [BNAE, 99] BNAE, Bureau de Normalisation de l’Aéronautique et de l’Espace. « *Recommandation générale pour la spécification de management de programme, RG. Aéro 000 40* », 1999.
- [Boothroyd *et al.*, 01] Geoffrey BOOTHROYD, Peter DEWHURST et Winston KNIGHT, “*Product design for manufacturing and assembly*”, Marcel Dekker, 2001.
- [Boothroyd, 88] Geoffrey BOOTHROYD, “*Estimate costs at an early stage*”, American Machinist, Vol. 132, n°8, pp. 54-57, August 1988.

- [Bordegoni *et al.*, 04] Monica BORDEGONI, Matteo BENASSI, Umberto CUGINI et Gaetano CASCINI, “*Roadmap for the selection and the evaluation of PLM tools in product development processes*”, in *Tools and Methods of Competitive Engineering*, Edited by Imre Horvath, Paul Xirouchakis, Millpress Rotterdam Netherlands, ISBN 90-5966-018-8, Vol. 1, pp. 319-330, 2004.
- [Bradley et Jordan, 96] Padraig BRADLEY et Paddy JORDAN, “*ENAPS Business Model*”, ENAPS WP3.2 Final Deliverable, CIMRU, University College, Galway, Ireland, 1996.

C

- [Cavailles, 95] Jean CAVAILLES, « *Méthodes de management de programme* », 2^{ème} édition, DGA-Teknea, 1995.
- [Chandrasekaran et Josephson, 00] B. CHANDRASEKARAN et John R. JOSEPHSON, “*Function in device representation*”, *Engineering with computers, Computer Aided Engineering*, Vol. 6, pp. 162–177 (Special Issue), 2000.
- [Chettaoui, 08] Hamène CHETTAOUI, “*Interopérabilité entre modèles hétérogènes en conception collaborative*”, Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, décembre 2008.
- [Christofol *et al.*, 06] Hervé CHRISTOFOL, Anthony DELEMARRE, Razvan LUPAN, Mihaela BARREAU et Christian ROBLEDO, “*Product, process and organisation of innovation projects: Setting up a performance evaluation system*”. In *Revue internationale d'ingénierie numérique*, Vol. 2, n°1-2, pp. 199-210, 2006.
- [Coastes *et al.*, 00] Graham COASTES, Robert Ian WHITFIELD, Alex H. B. DUFFY, et Bill HILLS, “*Coordination Approaches and Systems – Part II: An Operational Perspective*”, *Research in Engineering Design*, Vol. 12, pp. 73-89, 2000.
- [Constant, 96] Damien CONSTANT, « *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques* », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble 1, 1996.
- [Culversouse, 95] Phil F. CULVERSOUSE, “*Constraining designers and their CAD Tools*”, *Design Studies*, Vol. 16, n°1, pp. 81-101, January 1995.

D

- [Danesi *et al.*, 93] Frédéric DANESI, Nicolas GARDAN, Yvon GARDAN et Michael REIMERINGER, “*P4LM: A methodology for product lifecycle management*”. *Computers in Industry*. Vol. 59, n°2-3, pp. 304-317, mars 2008.
- [Dantan et Qureshi, 09] Jean-Yves DANTAN et Ahmed-Jawad QURESHI, “*Worst-case and statistical tolerance analysis based on quantified constraint satisfaction problems and Monte Carlo simulation*”, *Computer Aided Design*, Vol. 41, n°1, pp. 1-12, 2009.

-
- [Dieter, 00] George Ellwood DIETER, “*Engineering design – A materials and processing approach*”, 3rd edition, Mc Graw-Hill International Editions, 2000.
- [Dorst et Vermaas, 05] Kees DORST et Pieter E. VERMAAS, “*John Gero's function-behaviour-structure model of designing: A critical analysis*”, *Research in Engineering Design*, Vol. 16, n°1-2, pp. 17-26., doi: 10.1007/s00163-005-0058-z, 2005.
- [Doumeingts *et al.*, 96] Guy DOUMEINGTS, Philippe GIRARD et Benoît EYNARD, “*GIM : GRAI Integrated Methodology for product development*”, Chapitre de “*Design for X: Concurrent Engineering Imperatives*”, Chapman & Halls, pp. 153-172, 1996.
- [Doumeingts *et al.*, 98] Guy DOUMEINGTS, Bruno VALLESPER et David CHEN, “*Decision modelling GRAI grid*”, Chapter in *Handbook on Architecture for Information Systems*, P. Bernus, K. Mertins, & G. Schmidt (Eds.), Springer-Verlag, pp. 313-337, 1998.
- [Doumeingts, 84] Guy DOUMEINGTS, « *Méthode GRAI: méthode de conception des systèmes en productique* », thèse d'Etat, Université Bordeaux 1, 1984.
- [Ducq, 07] Yves DUCQ, « *Evaluation de la performance d'entreprise par les modèles* », Mémoire d'Habilitation à Diriger la Recherche, Université Bordeaux 1, 5 décembre 2007.
- [Dufaure, 05] Jérôme DUFAURE, « *Intégration et traçabilité du transfert de spécifications géométriques dans le cycle de conception d'un produit* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 8 juin, 2005.
- [Dufaure et Teissandier, 08] Jérôme DUFAURE et Denis TEISSANDIER, “*A tolerancing framework to support geometric specifications traceability*”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, n°9-10, pp. 894-907, April 2008.
- [Duffy *et al.*, 97] Alex H.B. DUFFY, Mogens Myrup ANDREASEN, F.J. O'DONNELL et M. GIROD, “*Design Coordination*”, *Proceedings ICED 97*, Tampere, août 1997.
- [Dupinet, 91] Eric DUPINET, « *Contribution à l'étude d'un système informatique d'aide à la conception de produits mécaniques par la prise en compte des relations fonctionnelles* », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1991.

E

-
- [Ebert et Man, 08] Christof EBERT et Jozef De MAN, “*Effectively utilizing project, product and process knowledge*”. In *Information and Software Technology*, Vol. 50, n°6, pp. 579-594, mai 2008.
- [El Khalkhali, 02] Imad EL KHALKHALI, « *Système intégré pour la modélisation, l'échange et le partage des données de produit* », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 8 octobre 2002.

- [Esteves et Pastor, 01] José ESTEVES et Joan PASTOR, “*Enterprise resource planning systems research: an annotated bibliography*”, Communication of AIS, Vol. 7, n°8, pp. 1–52, August 2001.
- [Eynard *et al.*, 97] Benoît EYNARD, Philippe GIRARD et David CHEN, « *Un modèle produit support à la conduite de processus de conception* », 2^{ème} Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel, Albi, 1997.
- [Eynard, 99] Benoît EYNARD, « *Modélisation du produit et des activités de conception - Contribution à la conduite et à la traçabilité du processus d'ingénierie* », Thèse de doctorat, juin 1999.
- [Eynard, 00] Benoît EYNARD, « *Intégration de connaissances et capitalisation de savoir-faire : outils d'aide en conception* », Présentation GDR-MACS, 2000.

F

- [Fanchon, 94] Jean-Louis FANCHON, « *Guide des Sciences et technologies industrielles* », AFNOR-Nathan, 1994.

G

- [Gero, 90] John S. Gero, “*Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design*”, AI Magazine, Vol. 11, n°4, pp. 26-36, 1990.
- [Girard *et al.*, 98] Philippe GIRARD, Benoît EYNARD et Guy DOUMEINGTS, “*Proposal to control the systems design process: application to manufactured products*”, 2nd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Compiègne, France, 1998.
- [Girard et Doumeingts, 04] Philippe GIRARD et Guy DOUMEINGTS, “*Modelling of the engineering design system to improve performance*”, Computers & Industrial Engineering, Vol. 46, n°1, pp. 43-67, 2004.
- [Girard, 99] Philippe GIRARD, « *Etude de la conduite de la conception des produits manufacturés : contribution à l'ingénierie des systèmes de conception* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1999.
- [Gonçalves *et al.*, 07] Manuel GONÇALVES, Denis TEISSANDIER et Philippe GIRARD, « *Proposition d'indicateurs produit, processus, organisation pour assurer l'adéquation entre l'expression d'un besoin et les spécifications du produit* », 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août 2007.
- [Gonçalves *et al.*, 09] Manuel GONÇALVES, Denis TEISSANDIER et Philippe GIRARD, « *Déploiement de spécifications PPO dans le cycle de conception pour l'aide à la décision : Application à un mât de réacteur* », 11^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, 22-24 avril 2009.

-
- [Gonçalves *et al.*, 10] Manuel GONÇALVES, Denis TEISSANDIER et Philippe GIRARD, “*Transfer of project specifications applied to use of performance indicators*», Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Bordeaux, 2010.
- [Grabowski *et al.*, 95] Hans GRABOWSKI, Ralf Stefan LOSSACK et Clemens WEIS, “*Supporting the design process by an integrated knowledge based design system*”, Advances in formal design methods for CAD – IFIP International Conference, Mexico, Mexique, 1995.

H

-
- [Hadj-Hamou, 02] Khaled HADJ-HAMOU, « *Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, décembre 2002.
- [Haffey et Duffy, 01] M.K.D. HAFHEY et Alex H.B. DUFFY, “*Process Performance Measurement Support – A Critical Analysis*”, Proceedings ICED01, Glasgow, UK, août 2001.
- [Harani, 97] Yasmina HARANI, « *Une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997.
- [Hubka et Eder, 01] Vladimir HUBKA et W. Ernst EDER, “*Design Science*”, Edited for the web by Filippo A. SALUSTRI, 2001.
- [Hubka *et al.*, 88] Vladimir HUBKA, Mogens Myrup ANDREASEN et W. Ernst EDER, “*Practical Studies in systematic design*”, Butterworths, London, 1988.

I

-
- [ISO 1101, 04] ISO 1101, « Spécification géométrique des produits (GPS) -- Tolérancement géométrique -- Tolérancement de forme, orientation, position et battement », 2004.
- [ISO 286-1, 10] ISO 286-1:2010, « Spécification géométrique des produits (GPS) -- Système de codification ISO pour les tolérances sur les tailles linéaires -- Partie 1: Base des tolérances, écarts et ajustements », 2010.
- [ISO 406, 87] ISO 406, « Dessins techniques -- Tolérancement de dimensions linéaires et angulaires », 1987.
- [ISO 5459, 81] ISO 5459, « Dessins techniques -- Tolérancement géométrique -- Références spécifiées et systèmes de références spécifiées pour tolérances géométriques », 1981.
- [ISO 8015, 85] ISO 8015, « Dessins techniques -- Principe de tolérancement de base », 1985.

- [ISO 8402, 94] ISO 8402, « Vocabulaire pour le management et l'assurance de la qualité », AFNOR, 1994.

J

- [Jo *et al.*, 93] Hyeon H. JO, Hamid R. PARSAEI et William G. SULLIVAN, "*Principles of concurrent engineering*", Concurrent Engineering: Contemporary issues and modern design tools, Edited by HAMID R. PARSAEI and WILLIAM G. SULLIVAN, Chapman & Hall, 1993.
- [Judson, 96] Arnold S. JUDSON, "*Making strategy happen: transforming plans into reality*", Blackwell Publishers, 2nd edition, London, ISBN 978-1-55786-721-6, 1996.

K

- [Kaplan et Norton, 93] Robert S. KAPLAN et David P. NORTON, "*Putting the Balanced Scorecard to work*", Harvard Business Review, pp. 134-147, septembre – octobre 1993.
- [Kaplan et Norton, 96] Robert S. KAPLAN et David P. NORTON, "*Using the Balanced Scorecard as a strategic management system*", Harvard Business Review, pp. 75-85, janvier – février 1996.
- [Kersseens-van Drongelen et Bilderbeek, 99] Inge C. KERSSSENS-VAN DRONGELEN et Jan BILDERBEEK, "*R&D performance measurement: more than choosing a set of metrics*", R&D Management, Vol. 29, n°1, pp. 35-46, 1999.
- [Kjellberg et Schmekel, 92] Torsten KJELLBERG et Hans SCHMEKEL, "*Product modelling and Information Integrated Engineering Systems*", Annals of the CIRP, Vol. 41, n°1, 1992.
- [Kleinhans, 99] Stéphane KLEINHANS, « *Intégration de la modélisation d'entreprise dans une démarche de stratégie industrielle* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1999.
- [Krause *et al.*, 93] Frank-Lothar KRAUSE, Fumihiko KIMURA, T. KJELLBERG, S. LU, Van der WOLF, L. ALTING, H.A. ELMARAGHY, W. EVERSHEIM, K. IWATA, N.P. SUH, V.A. TIPNIS, M. WEEK, A.C.H., "*Product Modelling*", Annals of the CIRP, Vol. 42, n°2, 1993.

L

- [Labrousse, 04] Michel LABROUSSE, « *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise* », Thèse délivrée conjointement par l'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, juillet 2004.
- [Ledoux *et al.*, 09] Yann LEDOUX, Denis TEISSANDIER et Samir SID-AHMED, "*Reliability analysis of the functional specification applied to a gas turbine of helicopter*", 11th CIRP seminar on Computer-Aided Tolerancing, Annecy, 2009.

-
- [Le Moigne, 99] Jean-Louis LE MOIGNE, « *La modélisation des systèmes complexes* », Afcet Systèmes, Ed. Dunod, Paris, 1999.
- [Le Moigne, 77] Jean-Louis LE MOIGNE, « *La théorie du système général. Théorie de la modélisation* », Presses Universitaires de France, Paris, 1977.
- [Lenguin, 96] C. LENGUIN, « *Spécification pour un langage de représentation du processus de conception en génie mécanique* », Mémoire de DEA de Production Automatisée, ENS Cachan, Université Nancy I, 1996.
- [Love, 02] Terence LOVE, “*Constructing a coherent cross-disciplinary body of theory about designing and designs: some philosophical issues*”, Design Studies, Vol. 23, n°3, pp. 345-361, May 2002.
- [Luneau et al., 03] Frédéric LUNEAU, Olivier CANAL et Paul CLOZEL, « *Tolérances 3D : Airbus applique la méthode 3A avec un outil de chaînes de cotes 3D* », Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique, Vol. 18, n°1, ISSN 1266-0175, pp. 37-60, 2003.
- [Lynch et Cross, 95] Richard L. LYNCH et Kelvin F. Cross, “*Measure up! How to Measure Corporate Performance*”, 2nd edition. Blackwell Publishers, Cambridge, USA, ISBN 978-1-55786-718-6, 1995.

M

-
- [Malhene, 00] Nicolas MALHENE, « *Gestion des processus d'évolution des systèmes industriels – conduite et méthode* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2000.
- [Marcotte, 95] François MARCOTTE, « *Contribution à la modélisation des systèmes de production : extension du modèle GRAI* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1995.
- [Martin, 09] Patrick MARTIN, « *L'usage des Systèmes d'Information PLM (Product Life-Cycle Management) contribue t-il à l'innovation collaborative ?* », Thèse Professionnelle, Mines ParisTech, 12 mai 2009.
- [Maskell, 91] Brian H. MASKELL, “*Performance Measurement for World Class Manufacturing*”, Productivity Press, Cambridge, ISBN 978-0-915299-99-7, 1991.
- [Merlo, 03] Christophe MERLO, « *Modélisation des connaissances en conduite de l'ingénierie : Mise en œuvre d'un environnement d'assistance aux acteurs* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, décembre 2003.
- [Merlo, 09] Christophe MERLO, « *Systèmes d'information supports aux acteurs, en conduite de la conception* », Mémoire d'HDR, Université Bordeaux 1, 20 mai 2009.

- [Mesarovic *et al.*, 70] Mihajlo D. MESAROVIC, Donald MACKO et Yasuhiko TAKAHARA, “*Theory of hierarchical, multilevel systems*”, Academic Press, New-York, 1970.
- [Mintzberg, 89] Henry MINTZBERG, « *Le management : voyage au centre des organisations* », Les Editions d'Organisation, 1989.
- [Mony, 92] Charles MONY, « *Un modèle d'intégration des fonctions conception-fabrication dans l'ingénierie de produit* », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1992.
- [Mouton, 10] Serge MOUTON, « *Intégration des contraintes d'industrialisation des pièces en matériaux composites pour l'aide à la décision en conception préliminaire appliqué au procédé RTM* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 21 mai 2010.

N

- [Nagendra *et Plaza*, 96] M.V. NAGENDRA PRASAD et Enric PLAZA, “*Corporate memories as distributed case libraries*”, In GAINES B. et MUSEN M., éditeurs : *Proceedings of the 10th Knowledge Acquisition for Knowledge-based Systems Workshop (KAW'96)*, Vol. 2, pp. 1-19, Banff, Alberta, Canada, 9-14 November 1996.
- [Nami, 95] Ould Wane NAMI, « *Une approche multicritère d'analyse et de conduite de l'ingénierie des produits utilisant le modèle GRAI et les ensembles flous* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1995.
- [Nanni *et al.*, 92] Alfred J.NANNI, J. Robb DIXON et Thomas E. VOLLMAN, “*Integrated Performance Measurement: Management Accounting to Support the New Manufacturing Realities*”, *Journal of Management Accounting Research*, pp. 1-19, 1992.
- [Neely *et al.*, 02] Andy NEELY, Chris ADAMS et Mike KENNERLEY, “*The Performance Prism: The Scorecard for Measuring and Managing Stakeholder Relationships*”, Financial Times/Prentice Hall, London, 2002.
- [NF X 50-151, 91] NF X 50-151, « *Analyse de la Valeur, Analyse Fonctionnelle, Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel* », 1991.

O

- [O'Donnell et Duffy, 01] F.J. O'DONNELL et Alex H.B. DUFFY, “*Performance Management at Design Activity Level*”, *Proceedings ICED01*, Glasgow, août 2001.
- [Ouertani et Gzara, 08] Mohamed-Zied.OUERTANI et Lilia.GZARA, “*Tracking product specification dependencies in collaborative design for conflict management*”, *Computer-Aided Design*, Vol. 40, n°7, pp. 828-837, juillet 2008.

P

- [Pahl et Beitz, 96] Gerhard PAHL et Wolfgang BEITZ, “*Engineering design – A systematic approach*”, 2nd edition, Springer-Verlag, London, 1996.
- [Pailhès et al., 07] Jérôme PAILHÈS, Mohammed SALLAOU et Jean-Pierre NADEAU 2007, “*Knowledge base formulation for aided design tool*”, Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II, ISBN 978-1402067600, Serge Tichkiewitch, Michel Tollenaere et Pascal Ray Editors, pp. 231-244, 2007.
- [Park et al., 96] Robert E. PARK, Wolfhart B. GOETHERT et William A. FLORAC, “*Goal Driven Software Measurement – A guidebook*”, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 1996.
- [Perez et al., 03] Roberto Luchini PEREZ, André OGLIARI, Nelson BACK et Roberto Antonio MARTINS, “*Development of a model for assessment of design process performance*”, Proceedings of 14th International Conference on Engineering Design (ICED’03), Stockholm, Stockholm, Design Society, Linköping, Sweden, pp. 165-166, ISBN 978-1-904670-00-1, 19-21 August 2002.
- [Pierre et al., 09] Laurent PIERRE, Denis TEISSANDIER et Jean-Pierre NADEAU, “*Integration of thermomechanical strains into tolerancing analysis*”, International Journal on Interactive Design and Manufacturing, Vol. 3, pp. 247-263, 2009.
- [Pierre et al., 10] Laurent PIERRE, Denis TEISSANDIER et Jean-Pierre NADEAU, “*Qualification of turbine architectures in a multiphysical approach: application to a turboshaft engine*”, Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Bordeaux, 2010.
- [Pillet et al., 06] Maurice PILLET, Pierre-Antoine ADRAGNA et Frédéric GERMAIN, “*Inertial Tolerancing: The Sorting Problem*”, Journal of Machine Engineering: Manufacturing Accuracy Increasing Problems, optimization, Vol. 6, n°1, pp. 95-102, 2006.
- [Pomian, 96] Joanna POMIAN, « *Mémoire d'entreprise, techniques et outils de la gestion du savoir* », ISBN 978-2911761003, Ed Sapientia, juin 1996.
- [Pritchard, 90] Robert D. PRITCHARD, “*Measuring and Improving organizational productivity: a practical guide*”, Praeger Publishers, New York, 1990.

Q

-
- [Quarante, 94] Danielle QUARANTE, « *Eléments de design industriel* », 2^{ème} édition, Editions Polytechnica, Paris, 1994.

R

-
- [Riou et Mascle, 09] Aurélien RIOU et Christian MASCLE, “*Assisting designer using feature modelling for lifecycle*”, Computer-Aided Design, Vol. 41, n°12, pp. 1034-1049, décembre 2009.
- [Robin et Girard, 05] Vincent ROBIN, Philippe GIRARD, « *Evaluation de la performance des processus collaboratifs de produits* », 9^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, avril 2005.
- [Robin et Girard, 06] Vincent ROBIN, Philippe GIRARD, “*An integrated product-process-organisation model to manage design system*”, 4th CESA Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, Pékin, Chine, 2006.
- [Robin, 05] Vincent ROBIN, « *Evaluation de la performance des systèmes de conception pour la conduite de l'ingénierie des produits ; prototype logiciel d'aide aux acteurs* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 5 décembre 2005.
- [Rodriguez et al., 09] Raul RODRIGUEZ RODRIGUEZ, Juan José ALFARO SAIZ et Angel ORTIZ BAS, “*Quantitative relationships between key performance indicators for supporting decision-making processes*”, Computers in Industry, Vol. 60, n°2, pp. 104-113, février 2009.
- [Rosenman et Gero, 98] Michael Anthony ROSENMAN et John Steven GERO, “*Purpose and function in design: from the social-cultural to the technico-physical*”, Design Studies, Vol. 19, n°2, pp. 161-186, 1998.
- [Roucoules et al., 06] Lionel ROUCOULES, Frédéric NOEL, Denis TEISSANDIER, Muriel LOMBARD, Gilles DEBARBOUILLE, Philippe GIRARD, Christophe MERLO et Benoît EYNARD, “*Ippop: An Opensource Collaborative Design Platform To Link Product*”, Design Process And Industrial Organisation Information, IDMME'06 Conference, Grenoble (Fr), May 17th – 19th, 2006.
- [Roucoules et Tichkiewitch, 2000] Lionel ROUCOULES et Serge TICHKIEWITCH, “*CoDE : a Co-operative Design Environment. A new generation of CAD systems*”, CERA journal, Vol.8, n°4, pp 263-280, December 2000.
- [Roy et Bouyssou, 93] Bernard ROY et Denis BOUYSSOU, « *Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et cas* », Economica, Paris, mai 1993.

S

- [Sadeghi, 08] Mohsen SADEGHI, « *Gestion dynamique des règles métiers dans les systèmes d'information dédiés à la conception collaborative* », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 21 octobre 2008.
- [Saucier, 97] Antoine SAUCIER, « *Un modèle multi-vues du produit pour le développement et l'utilisation de systèmes d'aide à la conception en ingénierie mécanique* », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Cachan, 1997.
- [Scaravetti, 04] Dominique SCARAVETTI, « *Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire* », Thèse de doctorat, ENSAM Centre de Bordeaux, décembre 2004.
- [Sellini, 99] Florence SELLINI, « *Contribution à la représentation et à la vérification des modèles de connaissances en ingénierie d'ensembles mécaniques* », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1999.
- [Simon, 60] Herbert Alexander SIMON, “*The new science of management decision*”, Harper & Row, New York and Evanston, 1960.
- [Sohlenius, 92] Gunnar SOHLENIUS, “*Concurrent Engineering*”, Annals of the CIRP, Vol. 41, n° 2, 1992.
- [Srinivasan, 97] Vijay SRINIVASAN, “*ISO deliberates statistical tolerancing*”, 5th CIRP seminar on Computer-Aided Tolerancing, Toronto, 1997.
- [Srinivasan, 03] Vijay SRINIVASAN, “*An Integrated View of Geometrical Product Specification and Verification*”, Geometric Product Specification and Verification: Integration of Functionality, Kluwer Academic Publishers, pp. 1-11, ISBN 9781402014239, 2003.
- [Sriram et al., 89] Duvuru SRIRAM, George STEPHANOPOULOS, Robert LOGCHER, David GOSSARD, Nicolas GROLEAU, David SERANO et Dundee NAVINCHANDRA. “*Knowledge-Based System applications in engineering design: Research at MIT*”, AI Magazine, Vol. 10, n°3, pp. 79-96, 1989.
- [Sudarsan et al., 05] Rachuri SUDARSAN, Steven J. FENVES, Ram D. SRIRAM, et Fujun WANG, “*A product information modeling framework for product life cycle management*”, Computer-Aided Design, Vol. 37, n°13, pp. 1399-1411, 2005.
- [Suh, 88] Nam Pyo SUH, “*Keynote papers, Basic concepts in design for productibility*”, Annals of the CIRP, Vol. 37, n°2, pp. 1-9, 1988.
- [Suh, 90] Nam Pyo SUH, “*The principles of design*”, Oxford University Press Inc, ISBN 978-0195043457, 1990.

- [Summers *et al.*, 01] Joshua D. SUMMERS, Noé VARGAS-HERNÁNDEZ, Zuozhi ZHAO, Jami J. SHAH et Zoé LACROIX, “*Comparative study of representation structures for modeling function and behavior of mechanical devices*” DETC Computers in Engineering, Pittsburgh, September 9-12, 2001.
- [Swift et Brown, 03] Kenneth G. SWIFT et Nathaniel J. BROWN, “*Implementation strategies for design for manufacture methodologies*”, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 217, n°6, pp. 827-833, 2003.

T

- [Teissandier et Dufaure 10] Denis TEISSANDIER et Jérôme DUFAURE, “*Product model for tolerancing*”, Chapitre 3 de Geometric Tolerancing of Products, Wiley, ISBN 9781848211186, 2010.
- [Tichkiewitch *et al.*, 95] Serge TICHKIEWITCH, Elsie CHAPA KASUSKY et Philippe BELLOY, « *Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée* », Congrès international de Génie Industriel de Montréal, Montréal (Canada), pp. 95-129, Octobre 1995.
- [Tichkiewitch, 96] Serge TICHKIEWITCH, “*Specifications on integrated design methodology using a multi-view product model*”, Engineering System Design and Analysis Conference – ASME’96, Montpellier, France, 1996.
- [Tollenaere, 94] Michel TOLLENAERE, « *Contribution à la modélisation de connaissances pour la conception mécanique* », Habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 1994.
- [Tollenaere et Constant, 97] Michel TOLLENAERE. et Damien CONSTANT, “*Linking conceptual and embodiment design of mechanical systems*” International Conference on Engineering Design - ICED’97, Tampere, Finlande, 1997.
- [Thornton, 03] Anna C. THORNTON, “*Variation risk management : Focusing Quality Improvements in Product Development and Production*”. Wiley, ISBN 9780471446798, novembre 2003.

U

- [Ullman, 03] David G. ULLMAN, “*The mechanical design process*”, 3rd edition, McGraw-Hill High Education, New York, 2003.
- [Umeda *et al.*, 90] Yasushi UMEDA, H. TAKEDA, Tetsuo TOMIYAMA et H. YOSHIKAWA, “*Function, behavior and structure*”, Applications of Artificial Intelligent in Engineering, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

V

- [Vargas, 95] Catalina VARGAS, « *Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques* », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1995.

[Vernadat, 96]

François B. VERNADAT, "*Enterprise modelling and integration: principles and applications*", Chapman & Hall, ISBN 0-412-60550-3, Londres, 1996.

W

[Wikipédia, 10]

Wikipédia, Organisation, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Organisation>, consulté en février 2010.

[Wisner et Fawcett, 91]

Joel D. WISNER et Stanley E. FAWCETT, "*Link firm strategy to operating decisions through performance measurement*", Production and Inventory Management Journal, Third Quarter, Vol.32, n°3, pp.5-11, 1991.

Y

[Yannou, 98]

Bernard YANNOU, « *Analyse fonctionnelle et analyse de la valeur* », Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils, Hermès, Paris 1998.

[Yesilbas *et al.*, 09]

Lilia Gzara YESILBAS, Bertrand ROSE et Muriel LOMBARD, "*Specification of a repository to support collaborative knowledge exchanges in IPPOP project*", Computers in Industry, v.57 n.8, pp.690-710, December 2006.

[Yvars, 01]

Pierre-Alain YVARS, « *Contribution à la représentation des connaissances en ingénierie intégrée de produits et de systèmes automatisés de production* », Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.

Z

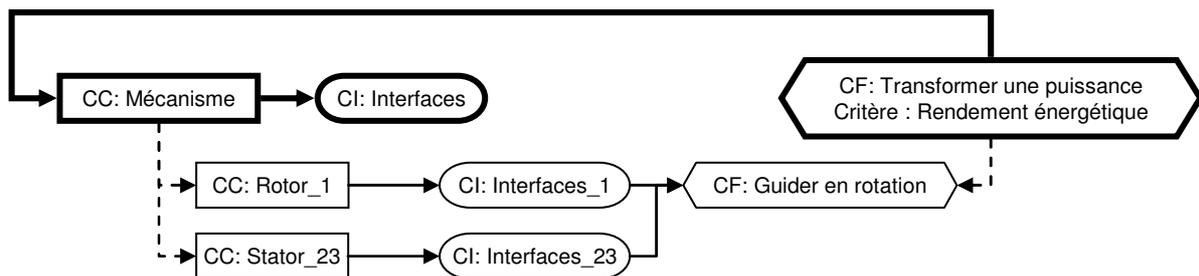
[Zanettin, 94]

Marc ZANETTIN, « *Contribution à une démarche de conception des systèmes de production* », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1994.

Annexe

Description détaillée de la méthode de détermination des spécifications produit liées au scénario de conception du chapitre 5

La décomposition classique d'une turbine haute pression est celle présentée dans par Annexe 1.

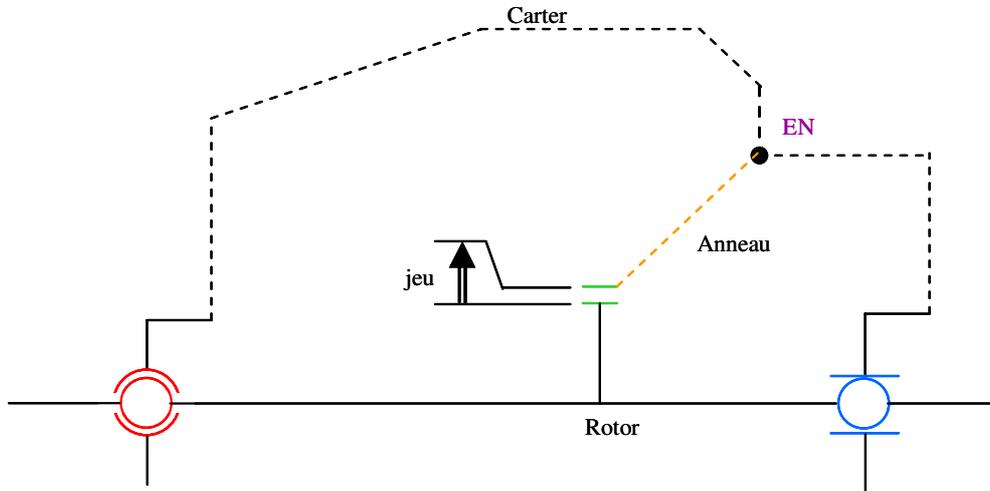


Annexe 1 : Décomposition classique de la turbine haute pression.

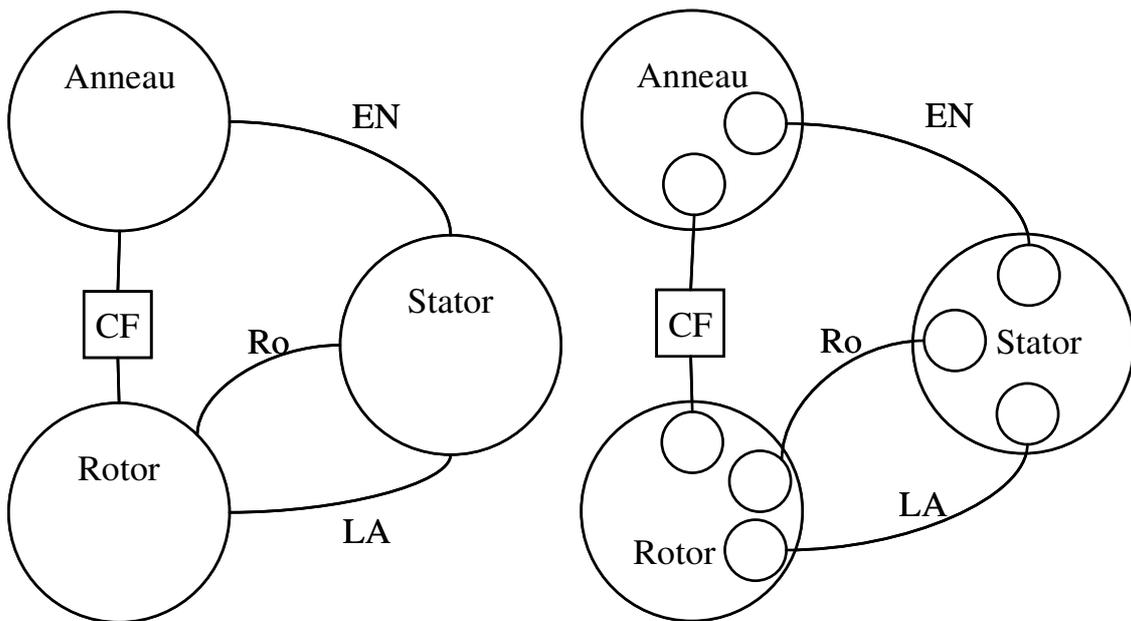
Les expertises métiers utilisent divers outils et modèles pour déterminer les spécifications sur le produit. Cette annexe montre comment ces outils peuvent être employés dans le cadre de la conception d'une turbine haute pression.

Expertise tolérancement géométrique.

Pour, l'expertise tolérancement géométrique nous avons retenu l'utilisation de deux outils : le schéma cinématique et le graphe de liaisons (voir Annexe 2 et Annexe 3)

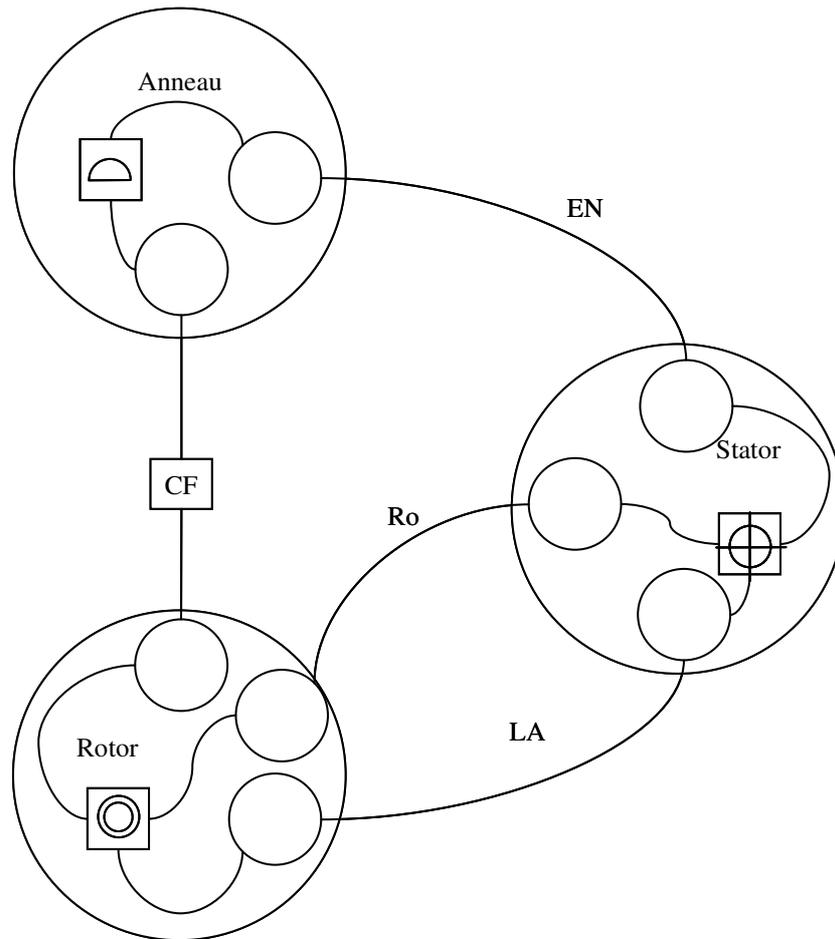


Annexe 2 : Schéma cinématique de la turbine haute pression.



Annexe 3 : Graphes de liaisons de la turbine haute pression.

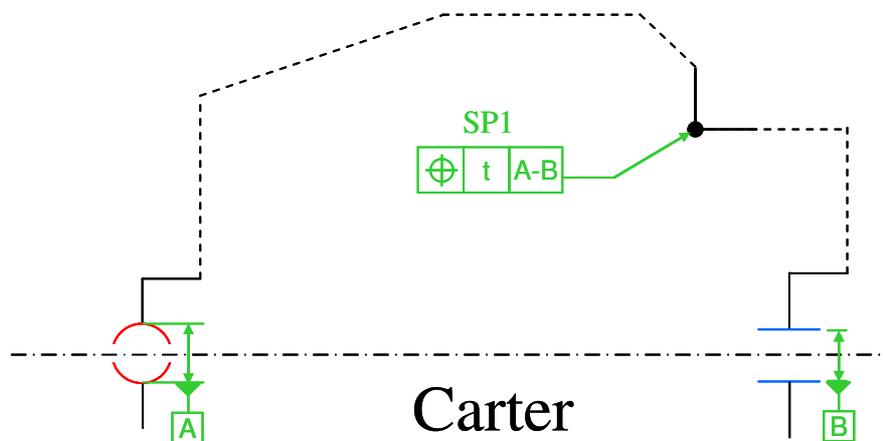
La démarche fonctionnelle de cotation permet d'effectuer un transfert interniveau afin de déterminer les spécifications géométriques sur les différentes pièces. L'utilisation de graphes de liaisons permet de définir qualitativement les spécifications géométriques à mettre en place : voir Annexe 4.



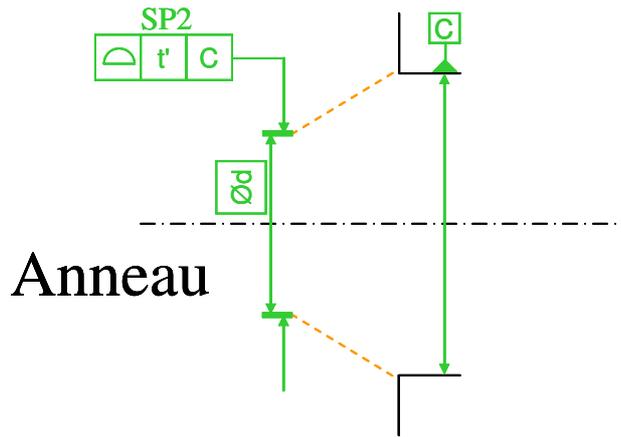
Annexe 4 : Graphe de liaison de la turbine haute pression, mise en place qualitative des spécifications géométriques.

L'utilisation d'outils de chaînes de cotes permet de déterminer les valeurs à associer aux diverses spécifications afin de commencer à définir les pièces du mécanisme : voir Annexe 5, Annexe 6 et Annexe 7.

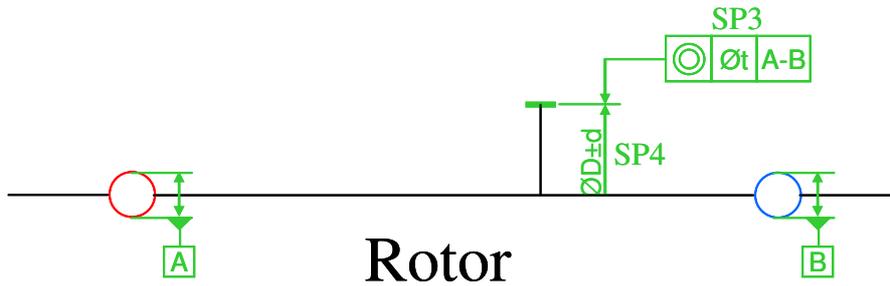
L'ensemble des spécifications déterminées au cours de ce transfert permet de compléter la définition du modèle produit : voir Annexe 8.



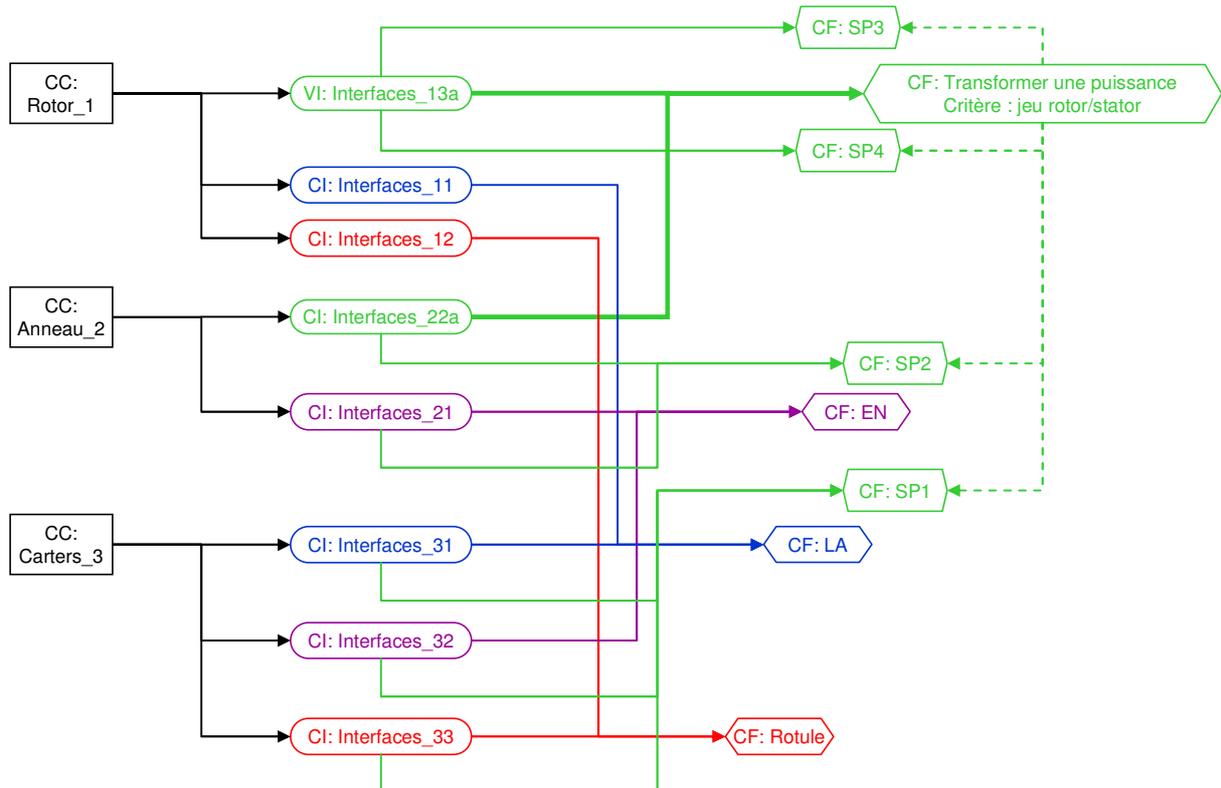
Annexe 5 : Définition préliminaire du carter (tolérancement géométrique).



Annexe 6 : Définition préliminaire de l'anneau (tolérancement géométrique).



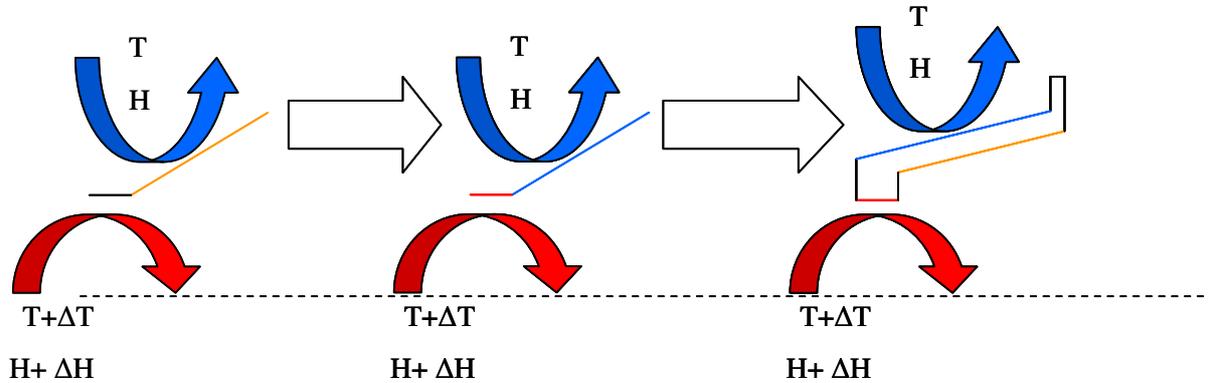
Annexe 7 : Définition préliminaire du rotor (tolérancement géométrique).



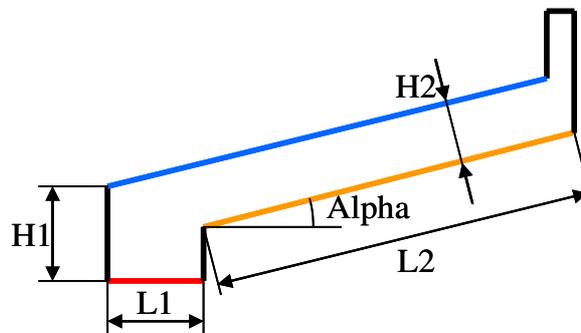
Annexe 8 : Modèle produit au niveau de détail 1 avec définition des spécifications nécessaires au critère « Jeu rotor/stator ».

Expertise thermomécanique.

L'expertise thermomécanique peut utiliser pour modéliser le produit et en particulier l'anneau, un modèle 2D axisymétrique (voir Annexe 9 et Annexe 10) et, dans une moindre mesure, le schéma cinématique.

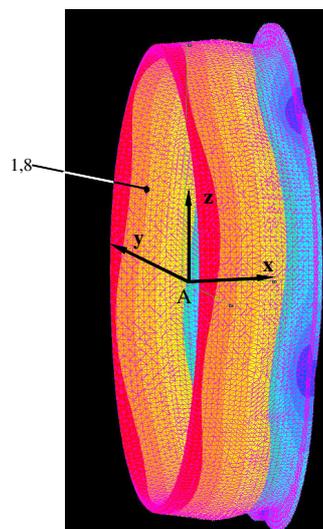


Annexe 9 : Modèle 2D axisymétrique de l'anneau de turbine.



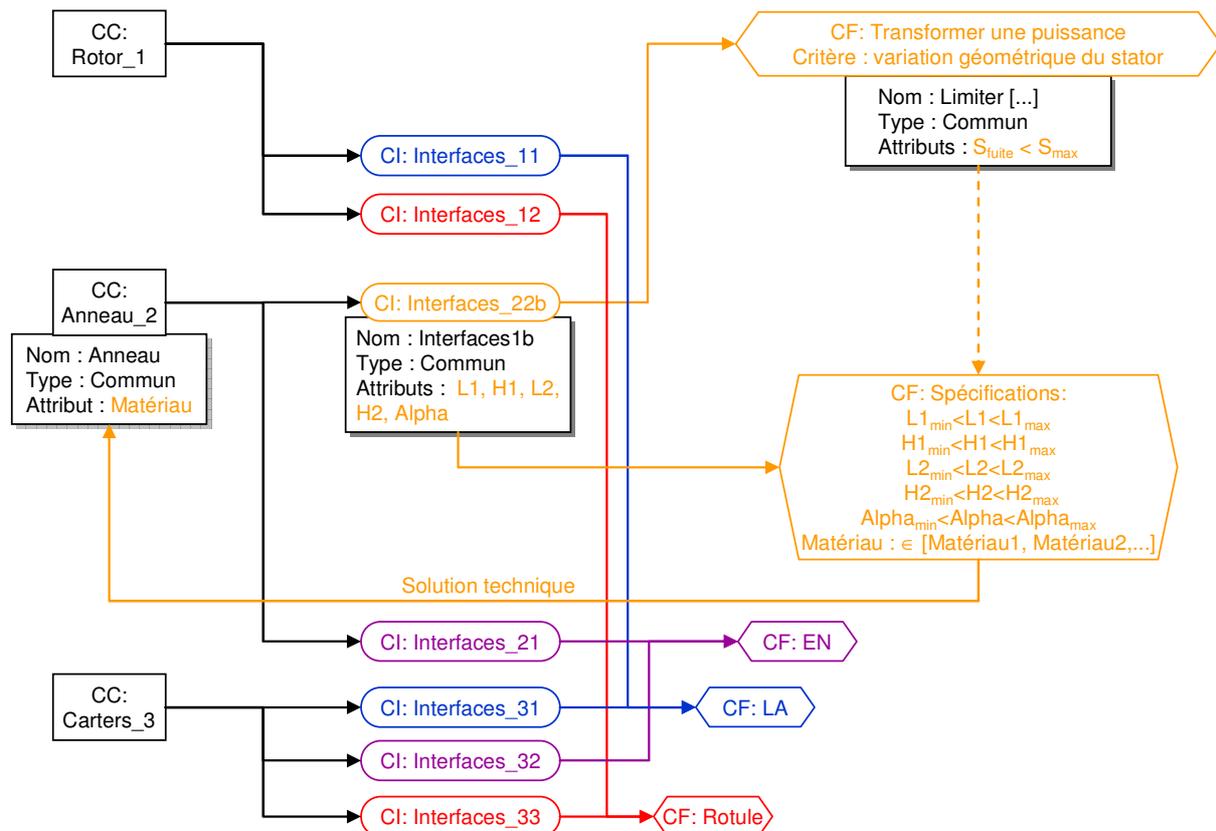
Annexe 10 : Représentation des paramètres liés à l'anneau de turbine.

L'implémentation des paramètres liés à la turbine dans un logiciel de calcul thermomécanique (type Samcef®) permet de déterminer, pour chaque paramètre, une plage de données (voir Annexe 11). Cette détermination correspond à un transfert de spécifications interniveau.



Annexe 11 : Champs de déplacement de l'anneau de turbine obtenu par Samcef®
[Pierre et al., 09]

L'ensemble des spécifications déterminées au cours de ce transfert permet de compléter la définition du modèle produit : voir Annexe 12.

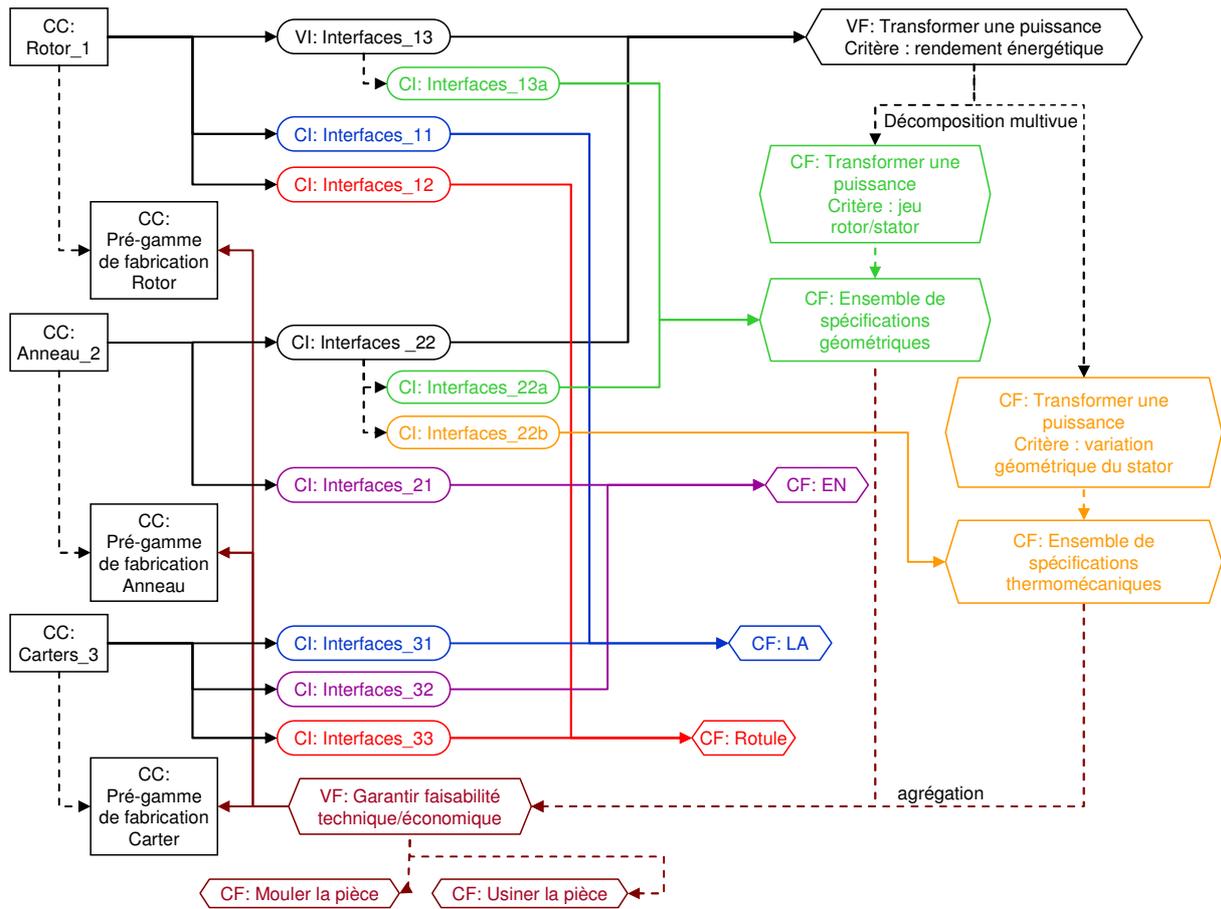


Annexe 12 : Modèle produit au niveau de détail 1 avec définition des spécifications nécessaires au critère « Variation géométrique du stator ».

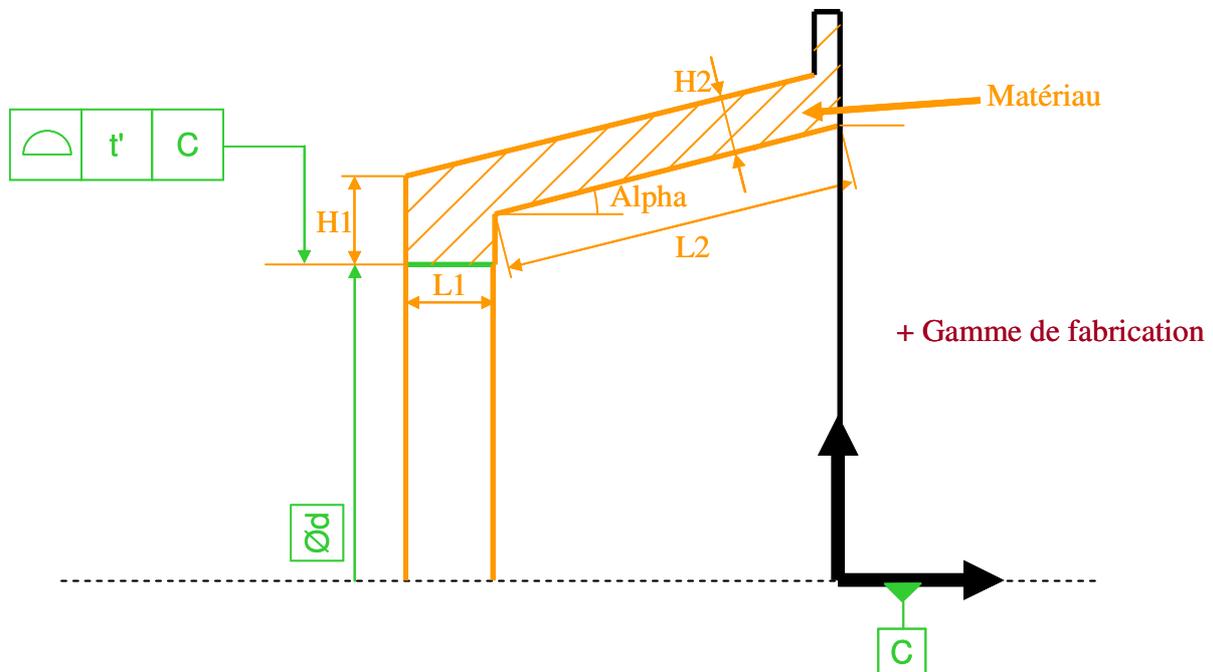
Agrégation des spécifications obtenues en bureau d'études pour exploitation en bureau des méthodes.

Les spécifications déterminées par les expertises tolérancement géométrique et thermomécanique sont regroupées au sein du modèle produit afin que le bureau des méthodes puisse exploiter ces données en vue de définir des spécifications sur la pré-industrialisation des pièces constituant le mécanisme.

Le résultat du processus de conception en phase architecturale peut être illustré, par exemple, par la représentation du modèle produit par un schéma rassemblant l'ensemble des spécifications : voir Annexe 14 pour l'anneau de turbine.



Annexe 13 : Représentation du modèle produit à l'état 1 complet.



Annexe 14 : Représentation schématique des spécifications liées à l'anneau de turbine.

Formalisation des transferts de spécifications projet dans le cycle de conception de produits manufacturés : application à un environnement de type Produit-Processus-Organisation

Résumé :

La performance d'un projet de conception de produits manufacturés est souvent caractérisée par un ensemble d'indicateurs qui ne repose pas uniquement sur la performance du produit mais sur celle du triptyque produit processus et organisation (PPO). L'utilisation d'indicateurs de performance dans un projet de conception ne peut être efficace que si les liens de traçabilité entre les données sont formalisés.

Durant le cycle de conception, de très nombreuses spécifications PPO, également appelées spécifications projet, sont déployées dans un environnement de conception collaborative. Ce déploiement consiste à transférer les spécifications de niveaux de détail donnés vers des niveaux de détail plus affinés (transfert interniveaux) et depuis des vues globales vers des vues particulières (transfert intervues). Ce travail propose de caractériser ces deux mécanismes de transferts, déjà introduits pour les spécifications géométriques, à l'ensemble des spécifications projet.

La formalisation et la généralisation de ces mécanismes de transferts ont été identifiées pour un ensemble de modèles pour la conception collaborative (un modèle produit, deux modèles processus (un pour le système décisionnel et un pour le système technologique) et un modèle organisation). Ces modèles constituent ainsi un environnement PPO. Le système décisionnel et le système technologique y sont décrits comme deux aspects du système de conception : l'un s'intéressant à l'organisation et aux processus, l'autre travaillant sur le produit même au travers d'un processus de conception. Les transferts de spécifications y sont ainsi illustrés.

La mise en place de perturbations dans un scénario de conception de turbine haute pression permet de mettre en évidence les liens de traçabilité entre les spécifications ainsi que les impacts des perturbations et des solutions censés les corriger. Un indicateur de performance énergétique ayant été défini, des perturbations sont simulées et des solutions sont proposées. La notion de compromis apparaît alors lorsque les solutions améliorent une caractéristique de l'indicateur de performance énergétique mais en dégrade une autre.

Mots clés :

Transfert de spécifications, Spécifications projet, Produit-Processus-Organisation, Modèle PPO, Traçabilité, Indicateurs de performance

Formalisation of project specifications transfers in the design cycle of manufactured products: application to a Product-Process-Organisation environment

Abstract:

Design project performance of manufactured products is often characterised by a set of indicators which does not depend only on the product's performance but also on that of the product process and organisation (PPO) triptych. The use of performance indicators in a design project can only be effective if the traceability links between the data are formalised.

During the design cycle, a lot of PPO specifications, also called project specifications, are deployed in a collaborative design environment. This deployment consists in transferring the specifications from a given detail level towards finer ones (interlevel transfer) and from a global view towards particular ones (interview transfer). This work proposes to characterise these two mechanisms of transfers, already introduced for geometrical specifications, with the whole of project specifications.

The formalisation and the generalisation of these mechanisms of transfers were identified for a set of models for collaborative design (one product model, two process models (one for the decision-making system and one for the technological system) and one organisation model). These models provide thus a PPO environment. The decision-making system and the technological system are described there as two aspects of design system: one concerned with the organisation and the processes, the other working on the product through a design process. Specifications transfers are thus illustrated there.

The introduction of disturbances in a design scenario of a high-pressure turbine can highlight the traceability links between specifications and the impacts of the disturbances and the solutions to correct them. An energetic performance indicator has been defined, disturbances are simulated and solutions are proposed. The compromise notion appears then when the solutions go better a characteristic of the energetic performance indicator but degrade another one.

Key words:

Specifications transfer, Project specifications, Product-Process-Organisation, PPO Model, Traceability, Performance indicators

